

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

ESTUDOS DE COLAPSO DE TENSÃO
ATRAVÉS DE DETERMINAÇÃO DE
AÇÕES DE CONTROLE COM AUXÍLIO DO
AUTOVETOR À ESQUERDA

Marcel Rocha

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Junho de 2009

© Copyright para Marcel Rocha, 2009

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

R672e

Rocha, Marcel

Estudo de colapso de tensão através de determinação de ações
de controle com o auxílio do autovetor à esquerda / Marcel Rocha.

-- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2009.

93 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza.

Co-orientador: Prof. Dr. Rafael Coradi Leme.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Colapso de tensão. 3. Estabilidade de sistemas. I. Souza, Antônio Carlos Zambroni, orient. II. Leme, Rafael Coradi, co-orient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

CDU 621.3.095.2(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Os abaixo assinados certificam que leram e recomendam o corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal de Itajubá a aceitação da Dissertação intitulada: “**Estudos de Colapso de Tensão Através de Determinação de Ações de Controle com Auxílio do Autovetor à Esquerda**” escrita por **Marcel Rocha** como requisitos parciais para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**.

Junho de 2009

Antônio Carlos Zambroni de Souza
Orientador

Rafael Coradi Leme
Co-orientador

Benedito Isaías de Lima Lopez
Examinador

Luiz Cláudio de Araújo Ferreira
Examinador

Aos meus pais

Hatos Rocha e

Iara de Fátima Rocha

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos de dificuldades. Em especial aos meus pais Hatos Rocha e Iara de Fátima Rocha, e aos meus irmãos Denis e Ronan Rocha.

Dedico um agradecimento especial ao meu orientador Antônio Carlos Zambroni de Souza por ter me dado um voto de confiança ao aceitar a orientação neste trabalho de mestrado. Agradeço pelo apoio e lições de vida durante todo esse período de convivência, pelo otimismo contagiante e a certeza de que tudo vai dar certo.

Ao meu co-orientador Rafael Coradi Leme, um agradecimento especial pelo apoio em toda a etapa de desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pelas conversas que foram muito além do mestrado e pelo apoio no momento crucial quando o mestrado parecia perdido e eu estava pronto a desistir, quando surge mais que uma palavra amiga: “vamos conseguir”.

Agradeço a Benedito Isaias Lima Lopes pelo apoio no meu primeiro sinal de desistência. Mesmo sem ter qualquer vínculo acadêmico neste meu trabalho de mestrado, sem hesitar se prontificou a ajudar e fez ultrapassar o primeiro obstáculo mais perigoso deste caminho.

Devo agradecer novamente e ressaltar o apoio de Antônio Carlos Zambroni e Rafael Coradi Leme, dedicação esta que foi muito além do papel de orientação neste mestrado. Tenho a convicção que sem o apoio extraordinário deles esse trabalho não teria se concretizado.

RESUMO

Esta dissertação discute a aplicação de controle de compensação de potência reativa e corte de carga no sistema para melhora da estabilidade de tensão do sistema. Aspectos relacionados à teoria de sistemas dinâmicos são revistos e discutidos durante o desenvolvimento da modelagem do sistema. A formulação extrapola a formulação ordinária do fluxo de carga e considera as equações dinâmicas das máquinas, definindo o equilíbrio completo do sistema. O modelo utilizado permite, por sua vez, identificar bifurcações de Hopf e sela-nó no sistema elétrico de potência.

Baseada na teoria de autovalores, o autovetor à esquerda associado ao autovalor crítico do sistema pode ser utilizado para identificar ações de controle no sistema, uma vez que traz informações sobre a sensibilidade dos parâmetros. Assim, uma aproximação do autovetor à esquerda, baseado no vetor tangente obtido durante o Método da Continuação é proposta, de forma a identificar ações de controle que melhorem a estabilidade do sistema a um baixo custo computacional.

A aproximação do vetor tangente é aplicada de forma a obter informação das barras mais propícias para realização de controle através da compensação de potência reativa e corte de carga, no intuito afastar o sistema da instabilidade de tensão.

Os testes das metodologias propostas são conduzidos no sistema New England de 39 barras, disponível na literatura.

ABSTRACT

This work discusses the problem of mitigating voltage stability problems by the means of reactive power control and load shedding. Some aspects related to the problem of dynamic systems are revisited and discussed along the system modeling. The proposed formulation takes into consideration the dynamic equations from the machines. Such a model enables one to identify Hopf and saddle-node bifurcations in an electrical power system.

Based on the eigenvalues theory, the left-eigenvector associated with the critical eigenvalue may be employed to identify some control actions, since it brings some important pieces of information regarding the parameter sensitivity. Hence, such a vector is early calculated with the help of a modified tangent vector, calculated along the continuation method. This vector is meant to enhance the system voltage stability with a low computational burden.

This vector is employed to identify the buses most likely to have reactive power compensation as well as experiment load shedding.

The tests are carried out with the help of the New England system, with 39 buses, will the limits considered.

CONTEÚDO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE DE TABELAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
CAPÍTULO 1	2
1. <i>Apresentação do problema</i>	2
1.1. <i>Introdução</i>	2
1.2. <i>O problema de Instabilidade de Tensão</i>	3
1.3. <i>Análise Estática e Análise Dinâmica</i>	5
1.4. <i>Determinação de Ações de Controle</i>	10
1.5. <i>Modelagem do Sistema Elétrico</i>	11
1.6. <i>Motivação</i>	12
CAPÍTULO 2	15
2. <i>Fundamentos Teóricos</i>	15
2.1. <i>Equações Diferenciais Ordinárias</i>	15
2.2. <i>Fluxo de Carga</i>	16
2.3. <i>Estabilidade de Tensão</i>	18
2.4. <i>Autovalores e Autovetores</i>	23
2.5. <i>Bifurcação em Sistemas Elétricos</i>	26
2.6. <i>Método da Continuação</i>	28
2.7. <i>Sistemas de Equações Algébrico-Diferenciais</i>	32
2.8. <i>Vetor Tangente e Autovetores</i>	34
2.9. <i>Limitação do Fluxo de Carga</i>	36
2.10. <i>Modelo Completo do Sistema</i>	37
2.10.1. <i>Gerador Síncrono</i>	38
2.10.2. <i>Regulador de Tensão</i>	39
2.10.3. <i>Regulador de Velocidade</i>	40
2.10.4. <i>Modelos de Carga</i>	41
2.10.5. <i>Equações de Rede</i>	41
2.10.6. <i>Transformadores Comutados Sob Carga</i>	42
2.10.7. <i>Modelo Completo do Sistema Elétrico</i>	43
2.11. <i>Método da Continuação para o Modelo Completo do Sistema</i>	43
2.11.1. <i>Limites</i>	46
2.12. <i>Bifurcação Sela-Nó no Modelo Completo do Sistema</i>	47
CAPÍTULO 3	49
3. <i>Resultados</i>	49
3.1. <i>Análise de Estabilidade</i>	49
3.2. <i>Obtenção da Margem de Carga</i>	51
3.3. <i>Aplicação no Modelo Completo do Sistema</i>	53
3.3.1. <i>Identificação de Compensação Reativa e Corte de Carga no Ponto de Colapso</i>	53
3.3.2. <i>Identificação de Compensação Reativa e Corte de Carga no Caso Base</i>	58
3.3.3. <i>Identificação de Compensação Reativa e Corte de Carga no Primeiro Passo do Método da Continuação</i>	61
3.4. <i>Aplicação no Modelo Estático do Sistema</i>	65
3.4.1. <i>Identificação de Compensação Reativa e Corte de Carga no Ponto de Colapso</i>	67
3.4.2. <i>Identificação de Compensação Reativa e Corte de Carga no Caso Base</i>	71

3.4.3. Identificação de Compensação Reativa e Corte de Carga no Primeiro Passo do Método da Continuação	74
CAPÍTULO 4.....	75
4. <i>Considerações Finais</i>	75
4.1. <i>Conclusão</i>	75
4.2. <i>Trabalhos Futuros</i>	79
CAPÍTULO 5.....	80
5. <i>Referências Bibliográficas:</i>	80
APÊNDICE A	82

LISTA DE DE TABELAS

TABELA 3.1 IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DE VTW E VT NO PONTO DE BIFURCAÇÃO.....	54
TABELA 3.2 IDENTIFICAÇÃO DE CORTE DE CARGA ATRAVÉS DE VTW E VT NO PONTO DE BIFURCAÇÃO	54
TABELA 3.3 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE.....	56
TABELA 3.4 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE.....	57
TABELA 3.5 IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DE VT_w E VT NO CASO BASE	58
TABELA 3.6 IDENTIFICAÇÃO DE CORTE DE CARGA ATRAVÉS DE VTW E VT NO CASO BASE.....	58
TABELA 3.7 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE.....	59
TABELA 3.8 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE.....	60
TABELA 3.9 IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DE VTW E VT NO CASO BASE	62
TABELA 3.10 IDENTIFICAÇÃO DE CORTE DE CARGA ATRAVÉS DE VTW E VT NO CASO BASE.....	62
TABELA 3.11 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE...	62
TABELA 3.12 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE...	64
TABELA 3.13 IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DE VTW E VT NO PONTO DE BIFURCAÇÃO.....	67
TABELA 3.14 IDENTIFICAÇÃO DE CORTE DE CARGA ATRAVÉS DE VTW E VT NO PONTO DE BIFURCAÇÃO	68
TABELA 3.15 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE...	69
TABELA 3.16 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE...	70
TABELA 3.18 IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DE VTW E VT NO CASO BASE	71
TABELA 3.19 IDENTIFICAÇÃO DE CORTE DE CARGA ATRAVÉS DE VTW E VT NO CASO BASE.....	71
TABELA 3. 20 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE..	72
TABELA 3.21 MARGEM DE CARGA DO SISTEMA DE 39 BARRAS CONSIDERANDO AS AÇÕES DE CONTROLE...	73

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: SISTEMA DE DUAS BARRAS	20
FIGURA 2.2: EQUÍLBRIO EM TRÊS CARREGAMENTOS (SISTEMA DE DUAS BARRAS).	21
FIGURA 2.3: EXEMPLO DE BIFURCAÇÃO SELA-NÓ ATRAVÉS DA EQUAÇÃO 2.30	28
FIGURA 2.4: MÉTODO DA CONTINUAÇÃO.....	30
FIGURA 2.4: DIAGRAMA DE BLOCOS DO REGULADOR DE TENSÃO IEEE-DC1	39
FIGURA 2.5: DIAGRAMA DE BLOCOS DO REGULADOR DE VELOCIDADE	41
FIGURA 3.1: SISTEMA <i>NEW ENGLAND</i> DE 39 BARRAS.....	49
FIGURA 3.2: TENSÃO NAS BARRAS DURANTE O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO – MODELO COMPLETO DO SISTEMA.....	52
FIGURA 3.3 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	56
FIGURA 3.4 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	57
FIGURA 3.5 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	59
FIGURA 3.6 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	61
FIGURA 3.7 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	63
FIGURA 3.8 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	64
FIGURA 3.9: TENSÃO NAS BARRAS DURANTE O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO – MODELO ESTÁTICO DO SISTEMA.....	66
FIGURA 3.10 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	69
FIGURA 3.11 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	70
FIGURA 3.12 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	72
FIGURA 3.13 – MARGEM DE CARGA PARA COMPENSAÇÕES SUGERIDAS POR <i>VTW</i> E <i>VT</i>	74

CAPÍTULO 1

1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

1.1. INTRODUÇÃO

Sistemas Elétricos de Potência (SEP) devem fornecer energia com condições operacionais adequadas, confiabilidade, continuidade dos serviços e com variações mínimas de tensão e frequência [1].

A maximização da exploração econômica dos SEP e o crescimento contínuo das cargas muitas vezes obrigam a priorizar critérios econômicos em detrimento dos técnicos na ampliação do sistema, levando-o a operar em condições cada vez menos favoráveis às perturbações inerentes ao funcionamento do sistema. Neste contexto, torna-se cada vez mais importante atuar no desenvolvimento de ferramentas de análise de forma a selecionar os componentes que possam oferecer a melhor solução de controle, mantendo a confiabilidade operativa em níveis seguros e proporcionando ao SEP altos índices de continuidade, qualidade e confiabilidade a menores custos econômicos.

O controle da operação do SEP pode ser dividida em três diferentes estágios [2]: Preventivo, emergencial e restaurativo.

Objetiva-se que o sistema opere na maior parte do tempo em seu estado seguro. Este estado é considerado como de operação normal do sistema, isto é, quando os limites do sistema e as margens de estabilidade não são violados.

No estado de operação emergencial, alguns limites podem estar violados tal como limites de geração de potência reativa nas máquinas ou sobrecargas marginais em linhas de transmissão e geradores, no entanto, o sistema atende suas principais demandas.

O estado restaurativo é aquele em que o sistema é levado novamente para o estado preventivo. Deve-se considerá-lo com o devido cuidado, uma vez que este abrange tanto a passagem do estado emergencial para o preventivo como, no pior dos casos, quando ocorre uma catástrofe maior, como em um colapso.

A operação do sistema está sujeita a diversas perturbações tal como um desligamento de uma unidade geradora, um curto-circuito em uma linha de transmissão ou uma variação de brusca de carga. Além disso, os aumentos contínuos nas cargas podem, eventualmente, dirigir o sistema a um estado instável caracterizado pela diminuição rápida dos valores da tensão nos barramentos. Este problema é denominado instabilidade de tensão e será abordado a seguir.

1.2. O PROBLEMA DE INSTABILIDADE DE TENSÃO

Com a exploração cada vez mais intensa dos sistemas, faz-se tomar foco o problema de instabilidade de tensão, problema este que é inerente a um nível de carregamento bastante elevado. Se ações efetivas de controle não são implementadas, sucessivos aumentos de carga podem levar um sistema à instabilidade. Este assunto passou a ter maior destaque devido a ocorrências de incidentes deste tipo em diversos países industrializados, inclusive no Brasil [3, 4, 5]. A instabilidade de tensão pode levar parte do sistema a níveis de tensão muito baixos, podendo se propagar para as demais regiões elétricas do sistema, com possibilidade de finalizar em um colapso de tensão [4,7]. Dentro deste contexto, o cálculo da margem de carga é importante. A margem de carga é uma indicação de quão longe o sistema está da instabilidade, ou seja, o quanto pode-se

umentar a carga do ponto de operação em análise até o limite de instabilidade do sistema. A partir desta informação o operador do sistema pode tomar a decisão correta de onde e quando realizar uma manobra no sistema, seja através de redespacho de geradores, abertura e fechamento de anéis através das linhas de transmissão, ilhamento de partes do sistema, inserção de bancos de capacitores ou, para um caso extremo, até mesmo o corte de carga. A margem de carga pode ser obtida por diversos métodos, como o Método da Continuação [6]. O Método da Continuação aplica incrementos de carga no sistema até que ele atinja o seu ponto de colapso.

Diversas ferramentas podem ser utilizadas para análise da estabilidade. O grau de complexidade e o detalhamento necessário são dependentes da análise a ser executada e dos fenômenos envolvidos. A análise por técnicas de autovalores, por exemplo, estuda a estabilidade de um sistema, em determinado ponto operativo, através da avaliação da matriz associada ao sistema. Para o caso do sistema elétrico, a matriz associada é o Jacobiano das equações que modelam o sistema, linearizado em torno de um ponto de equilíbrio. A cada autovalor está associado a um autovetor à direita e um autovetor à esquerda, que fornecem informações sobre a sensibilidade das variáveis de estado do sistema. Além disso, uma aproximação dos autovetores associados ao autovalor crítico pode ser utilizado. Neste trabalho explora-se a aproximação por meio do vetor tangente, obtido durante o Método da Continuação. O autovetor à esquerda associado ao autovalor crítico do sistema traz informações sobre a sensibilidade dos parâmetros do sistema e desta forma pode ser utilizado para identificar ações de controle. Assim, uma aproximação do autovetor à esquerda, baseado no vetor tangente obtido durante o Método da Continuação é discutida e proposta neste trabalho, de forma a identificar ações de controle que melhorem a estabilidade do sistema a um baixo custo computacional..

1.3. ANÁLISE ESTÁTICA E ANÁLISE DINÂMICA

Matrizes de Sensibilidade

A sensibilidade das variáveis de estado do sistema é obtida através do Jacobiano do fluxo de carga para um ponto de operação conhecido. Esta análise permite determinar as barras cujas variáveis de estado variam com maior intensidade em relação a uma variação de carga. A referência [8] discute o emprego desta técnica introduzindo o conceito de controlabilidade na análise de colapso de tensão, assumindo que o sistema elétrico não sofra nenhuma variação de potência ativa, com a barra swing absorvendo as variações de perdas elétricas do sistema. Estas considerações permitem que se reduza a matriz Jacobiana (que neste caso contém as equações de potência reativa das barras de tensão controlada) às derivadas parciais das equações de potência reativa em relação ao nível de tensão. Manipulações neste Jacobiano reduzido fornecem as matrizes de sensibilidade propostas pelo autor.

A inclusão dos limites de geração de potência reativa na análise por matrizes de sensibilidade é proposta em [9] e [10]. Esta última referência trata do problema de compensação de potência reativa para melhorar a condição de estabilidade do sistema.

Note, entretanto, devido a não linearidade das equações de sistemas de potência, as informações obtidas para um ponto de operação conhecido podem não ser válidas para outros pontos de operação. Portanto, além de determinar a barra/área crítica do sistema para um ponto de operação conhecido, deve-se saber se esta barra/área será a mesma na medida em que um aumento no carregamento do sistema o dirigir ao ponto de colapso. Estas informações, entretanto, não são fornecidas pelas matrizes de sensibilidade.

Teoria da Bifurcação

O estudo do comportamento da solução de um sistema de equações não lineares pode ser obtido através da teoria da bifurcação [11]. De todos os tipos de bifurcação, as bifurcações de sela-nó e hopf são as mais comuns em estudos da estabilidade da tensão. Se um modelo dinâmico de sistema é empregado, ambos os tipos podem ser detectados. Entretanto, se o modelo de fluxo de carga (estático) é escolhido, somente a bifurcação de sela-nó é possível de ser encontrada. A bifurcação de hopf é caracterizada pela existência de um par de autovalores puramente imaginários, enquanto que a bifurcação de sela-nó é caracterizada pela existência de um autovalor real nulo (matriz Jacobiana singular). Esta importante característica tem sido largamente explorada na literatura. As técnicas citadas nas seções subsequentes reconhecem o ponto de colapso de tensão como um ponto de bifurcação.

Método Direto

Encontra o ponto de sela-nó através do método de Newton-Raphson modificado. Ao conjunto de equações de fluxo de carga é incorporado um conjunto de equações para impor a singularidade da matriz Jacobiana e uma outra equação, para garantir a não trivialidade da solução (autovetor não nulo). A referência [12] emprega este método, que não fornece o diagrama de bifurcação e pode falhar se os limites de geração de potência reativa forem considerados. Problemas de convergência podem também ocorrer se o chute inicial estiver distante da solução.

Otimização

Neste estudo, em geral, a matriz Jacobiana é reduzida às equações de potência reativa em função do nível de tensão. Na proposição do problema, o incremento de carga é a função objetivo, cargas não otimizadas são restrições de igualdade e limites de geração

de potência reativa são as restrições de desigualdade. É assumido que a carga tenha um fator de potência constante durante o processo de carregamento do sistema.

As referências [13] – [15] propõem o método de pontos interiores como técnica de otimização. A primeira referência busca, a partir de um ponto de operação não factível, o ponto de bifurcação, enquanto a segunda se propõe a achar o ponto de máximo carregamento do sistema.

Valores Singulares e Autovalores

Consiste em, para cada ponto de operação, calcular o menor valor singular e autovalor da matriz Jacobiana. As referências [16,17] tratam da análise de estabilidade de tensão por valores singulares e autovalores, respectivamente. A medida em que aumenta-se o carregamento do sistema, o menor valor singular e o menor autovalor diminuem, até se tornarem nulos, quando o ponto de sela-nó é identificado. A referência [18], entretanto, mostra que estes índices sofrem uma variação brusca no ponto de bifurcação. Portanto, tais métodos tendem a falhar se um programa de fluxo de carga convencional for empregado, uma vez que tal variação brusca só é observada se o programa de fluxo de carga utilizado fizer uso de parametrização. Para uma matriz diagonalizável qualquer, todas as informações fornecidas pelos autovalores podem ser também obtidas pelos valores singulares, e vice-versa.

Determinante reduzido

Proposto em [19] como índice de estabilidade de tensão, baseia-se na redução da matriz Jacobiana à dimensão das equações de potências ativa e reativa de cada barra de carga em relação ao seu ângulo de fase e módulo da tensão. Esta matriz de dimensão 2×2 é calculada para todas as barras de carga do sistema. Para cada barra de carga, a matriz reduzida tem seu determinante calculado. A barra de carga associada ao menor

determinante é a barra crítica do sistema naquele ponto de operação. Entretanto, os mesmos problemas relatados na seção anterior são observados aqui, i.e., a barra crítica avaliada em um ponto de operação conhecido pode não ser a mesma no ponto de operação seguinte. De fato, este problema é observado em [20], onde a barra crítica do sistema muda de acordo com o aumento do carregamento. Se a barra crítica no ponto de bifurcação é conhecida e os limites de geração de potência reativa são desprezados, o determinante reduzido calculado em relação a esta barra fornece um comportamento quadrático em relação

o ao fator de crescimento de carga. Entretanto, se estes limites forem considerados (situação mais realista), uma descontinuidade é observada, conforme relatado em [18]. Esta descontinuidade é menos abrupta do que aquela observada no comportamento do menor autovalor e valor singular, e ocorre antes do ponto de bifurcação. Entretanto, o comportamento do determinante reduzido associado a outras barras de carga aproxima-se do comportamento obtido para os menores autovalor e valor singular, conforme mostrado em [18]. Portanto, este método também é incapaz de prever o ponto de bifurcação a partir de um ponto de operação conhecido.

Técnica da função de energia

Funções de energia foram inicialmente empregadas em sistemas de potência para estudos de estabilidade transitória. O método consiste em avaliar a energia total (cinética e potencial) de um sistema de potência durante um distúrbio (curto-circuito, por exemplo) no sistema. Para o sistema operar estável, a energia máxima que este pode vir a ter durante o tempo de distúrbio deve ser igual a um nível de energia associado a uma condição pós-falta. Esta metodologia determina o tempo crítico de abertura para o qual o sistema se mantém estável.

O método pode também produzir resultados interessantes para a análise de estabilidade de tensão. Nesta aplicação, somente a energia potencial do sistema é necessária, dispensando a inclusão de amortecimento e modelos complexos de geradores.

A aplicação da função de energia à análise de estabilidade de tensão baseia-se na medida da distância entre os pontos de equilíbrio estável e instável de um sistema. Como um sistema elétrico de n barras tem $2n - 1$ possíveis soluções de fluxo de carga, a determinação da solução instável de interesse não é trivial, como relatado em [21] e [22]. Uma técnica para obtenção destas soluções foi proposta em [23] com bons resultados. Na medida em que se aumenta o carregamento do sistema, o número possível de soluções diminui, até que somente uma solução exista, com nível de energia zero (ponto de bifurcação).

Técnicas de partição de redes

Os métodos expostos anteriormente são capazes de produzir resultados úteis para a análise de estabilidade de tensão. Entretanto, alguns destes índices podem falhar, se um programa de fluxo de carga convencional for empregado. Ainda que um processo de parametrização fosse incorporado, o comportamento destes índices mostra que seria necessário “caminhar” com o sistema até que o ponto de bifurcação seja encontrado. O método da função de energia, por outro lado, é capaz de estimar o ponto de colapso a partir de dois pontos de operação conhecidos, mas a determinação das soluções instáveis de interesse se constitui uma barreira. Baseado nestas dificuldades, técnicas de partição de redes pode ser de especial interesse, uma vez que a dimensão do sistema analisado pode ser substancialmente reduzida.

Diversos artigos na literatura mostram que colapso de tensão é um fenômeno que começa localmente e se espalha pelas barras vizinhas. Baseado nesta característica,

procura-se analisar o índice de segurança de um sistema de potência através do estudo de uma pequena parte do sistema. Uma vez obtido o subsistema de interesse, aplica-se qualquer uma das técnicas previamente discutidas. Referência [21] mostra que é possível particionar um sistema usando o método de Ward, que consiste em reter as barras de interesse através de manipulações na matriz Y . Entretanto, esta referência não propõe nenhum método para a identificação da área crítica, e diversas partições devem ser feitas para que o sistema inteiro seja devidamente estudado.

Método do vetor tangente

Discutido em [18], baseia-se no comportamento do maior componente do vetor tangente em função do crescimento de carga. O cálculo deste vetor é facilmente incorporado em qualquer programa de fluxo de carga convencional. Logo, sua facilidade de obtenção constitui uma grande vantagem em relação aos métodos previamente descritos. Entretanto, seu comportamento em função do aumento de carga produz a mesma descontinuidade observada no comportamento do determinante reduzido às equações da barra crítica do sistema, qualificando este método também como incapaz de estimar o ponto de bifurcação. Este problema é superado pela da extrapolação quadrática, que a partir de dois pontos de operação conhecidos busca o ponto de bifurcação através de tentativa e erro. Uma outra vantagem deste método refere-se a identificação da barra crítica, obtida para pontos de operação distantes do ponto de bifurcação.

1.4. DETERMINAÇÃO DE AÇÕES DE CONTROLE

A análise de estabilidade de tensão requer basicamente o estudo de três tópicos: distância até o ponto de colapso (margem de carga), determinação de barra/área crítica e determinação de ações de controle. Como mostrado anteriormente, os dois primeiros itens tem sido largamente estudados na literatura, e diversos métodos para a

determinação eficientemente rápida de um índice têm sido propostos, muito embora o assunto esteja longe de ser esgotado. O terceiro item, entretanto, tem sido pouco explorado. Corte de carga como medida emergencial para a operação de um sistema de potência tem sido proposto na literatura, enquanto a referência [23] propõe o uso de matrizes de sensibilidade para a determinação de ações de controle. Nenhuma destas referências busca a determinação destas ações através da barra/área crítica de um sistema. Esta proposta é feita na referência [24], onde ações de controle são determinadas através de matrizes de sensibilidade calculadas em função da barra crítica. Note-se que a determinação desta barra não é trivial, mas uma técnica eficiente para a determinação desta barra é proposta neste trabalho. Ações de controle contemplando corte de carga [25] e bloqueio de tapas de transformadores [26], além de redespacho de potência ativa nos geradores [27] também tem sido propostos com bons resultados.

Note, entretanto, que um dado interessante a ser estudado diz respeito a ações de controle que levem em consideração as características dinâmicas do sistema. Tal análise é desenvolvida em [28], onde uma seleção de contingências é proposta para análise como resultado da metodologia.

1.5. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO

Para análise em regime permanente geralmente a análise estática pode ser suficiente. Entretanto, desprezar as equações diferenciais que modelam o sistema pode distorcer a análise do seu ponto de equilíbrio [29]. No caso de análises de estabilidade de longo termo pode ser necessária.

O colapso de tensão é um fenômeno caracteristicamente não linear, e é usual abordá-lo a partir de métodos não lineares, como a teoria da bifurcação. A teoria das bifurcações tem como objetivo a análise no limiar da instabilidade e devem ser considerados

modelos do sistema conforme o fenômeno de interesse. Nas análises das bifurcações utilizam-se os modelos de sistemas elétricos de potência a partir de um conjunto de equações diferenciais, algébrico-diferenciais e estáticas (ou puramente algébricas) [30].

Diversos estudos de bifurcações são desenvolvidos baseados na aplicação do fluxo de carga convencional, no entanto a validade do modelo somente se confirma a partir de algumas preposições são assumidas. Quando um gerador é assumido como barra de geração, do ponto de vista dinâmico, implica que o gerador possui regulador de tensão com ganho estático infinito e controle perfeito da tensão secundária da máquina, preposições estas que não condizem com a realidade [12]. Este problema pode ser contornado representando-se por faixa os limites de tensão e de potência reativa dos geradores, que leva a resultados mais próximos à realidade,

No intuito de apresentar uma modelagem mais próxima do real, nesta dissertação são realizadas análises considerando as equações dinâmicas das máquinas, seus controles e seus respectivos limites. Formulação esta que vai além da convencional de fluxo de carga. É utilizada a formulação algébrico-diferencial, resolvendo-se as equações diferenciais e algébricas do sistema simultaneamente para um dado ponto de equilíbrio. Os limites de corrente de campo e armadura do gerador passam a ser considerados e simplificações sobre as barras swing e PV não são mais necessárias.

1.6. MOTIVAÇÃO

A operação do sistema elétrico de potência muitas vezes está sujeita a diversas perturbações, levando-o a seu estágio emergencial, ou restaurativo. Ocorrências como desligamento de alguma linha de transmissão, entrada de um grande bloco de carga e até mesmo sucessivos crescimentos de carga podem levar o sistema à instabilidade. Assim, é importante interagir no sistema de forma cirúrgica, atuando efetivamente nos controles que apresentam os melhores resultados. Tais ações permitiriam levar o sistema

novamente para seu estágio preventivo com menores transtornos para o restante do sistema, seja em termos de confiabilidade, em termos de abrir mão de operar em condição ótima (econômica) de despacho das usinas, manobrar bancos de capacitores ou mesmo corte de carga. Esta última opção é evitada a todo custo visto que suprir as cargas é a razão única de se existir o SEP.

Propõe-se neste trabalho uma aplicação baseada na teoria de autovalores. O autovetor à esquerda associado ao autovalor crítico do sistema pode ser utilizado para identificar ações de controle no sistema, uma vez que traz informações sobre a sensibilidade dos parâmetros. Assim, objetiva-se aplicar neste trabalho uma aproximação do autovetor à esquerda, baseado no vetor tangente obtido durante o Método da Continuação, de forma a identificar as melhores ações de controle do ponto de vista de estabilidade de tensão. O vetor tangente apresenta uma vantagem importante por permitir sua inclusão diretamente na formulação do fluxo de carga, proporcionando baixo custo computacional.

O problema de colapso de tensão está fortemente relacionado com o baixo suporte de potência reativa nas barras, muitas vezes relacionado à grande distância das gerações em relação aos centros de carga. Assim, um suporte local de potência reativa é importante para manter as condições operativas do sistema. As análises de sensibilidade também podem ser utilizadas para se definir os melhores locais para instalação compensação de potência reativa.

Finalmente, quando todas as ações de controle possíveis já foram implementadas, resta-se apenas a alternativa mais drástica, que é o corte de carga. De forma a criar o menor transtorno possível é importante tomar mão de técnicas que apontem as barras mais eficazes para levar o sistema a seu estágio preventivo, com o menor corte de carga possível.

As aplicações deste trabalho focam-se nas ações de controle baseadas em alocação de compensação de potência reativa e corte de carga. Deve ser observado que estas ações devem ser aplicadas em horizontes distintos de tempo. A compensação reativa é aplicada no planejamento da operação. O corte de carga é aplicado em último caso, quando todas as compensações reativas foram aplicadas e ainda são necessários ações de controle.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: No Capítulo II são descritos os aspectos teóricos nos quais se baseiam este trabalho. No Capítulo III apresenta-se a formulação do problema aplicado ao sistema *New England*, bastante conhecido na literatura. Finalmente, no Capítulo IV apresentam-se as conclusões deste trabalho indicando as possíveis contribuições desta dissertação.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. EQUACÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS

Qualquer sistema físico pode ser modelado por um conjunto de n equações diferenciais ordinárias (EDO). Quando o comportamento do sistema não depende explicitamente do tempo, este é dito autônomo e sua representação é dada geralmente por [31].

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.1)$$

onde x é um vetor $n \times 1$ de variáveis linearmente independentes que definem o estado do sistema. Desta forma, qualquer outra variável pode ser escrita como uma combinação destas variáveis de estado. Adicionalmente, f é um vetor composto por f_i , ($i=1,2,\dots,n$), que é uma função linear de todos os x_i , ($i=1, 2, \dots, n$).

Através da solução das EDOs pode-se inferir sobre o comportamento dinâmico de um sistema para determinada condição x_0 .

Ponto de Equilíbrio

Caso existam, os pontos de equilíbrio de uma EDO (2.1) é dados pela solução x_0 do sistema algébrico:

$$f(x) = 0 \quad (2.2)$$

Quando todas as soluções de (2.1) para qualquer condição inicial x nas redondezas de x_0 , permanece nas proximidades de x_0 quando $t \rightarrow \infty$ diz-se que o ponto de equilíbrio x_0 sistema é estável. O equilíbrio é dito assintoticamente estável se para qualquer condição

inicial x nas redondezas de x_0 a solução de (2.1) tender a x_0 . Se um equilíbrio não é estável, este é dito instável.

A partir de um ponto de equilíbrio podem-se realizar diversos estudos de estabilidade. As condições iniciais destes estudos podem ser obtidas através do fluxo de carga.

2.2. FLUXO DE CARGA

Através do fluxo de carga de um sistema de energia elétrica é possível se determinar o estado de regime permanente do sistema obtendo todas as suas variáveis de estado. De posse das variáveis de estado pode-se determinar qualquer outra variável de interesse [32].

Assim, diversos estudos em sistemas elétricos de potência (SEP) passam primeiramente pela resolução do fluxo de carga tais como análise de transitórios eletromagnéticos, estudos de expansão e operação segura do sistema e estudos de colapso de tensão.

Algumas simplificações são adotadas na resolução do fluxo de carga:

- ✓ As cargas ativas e reativas são consideradas constantes. Desta forma, o cálculo é equivalente a uma fotografia do sistema para uma condição de carga conhecida.
- ✓ O sistema elétrico trifásico é considerado equilibrado em relação às suas três fases e a representação unifilar é suficiente. Esta simplificação não altera de forma significativa a precisão dos resultados.

Geralmente os dados disponíveis para resolução do fluxo de carga são a potência entregue pelos geradores e suas tensões terminais (barras PV), as cargas conectadas ao sistema (barras PQ) e a topologia da rede. Um dos geradores deve ser designado como

referência angular do sistema (barra $V\theta^1$) sendo este responsável por modelar o equilíbrio do SEP entre geração, carga e perda. O resultado do fluxo de carga é o cálculo dos valores de tensão nas barras de carga e os ângulos de fase em todas as barras do sistema.

As equações do fluxo de carga são não-lineares e são resolvidas iterativamente. A equação (2.3) apresenta a formulação do problema.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{PV} \\ \Delta P_{PQ} \\ \Delta Q_{PQ} \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_{PV} \\ \Delta \theta_{PQ} \\ \Delta V_{PQ} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Onde ΔP_{PV} é o erro de potência ativa dos geradores (PV) e ΔP_{PQ} e ΔQ_{PQ} são os erros de potência ativa e reativa, respectivamente, das barras de carga (PQ). A matriz J representa a matriz Jacobiana do Fluxo de Potência, que representa as derivadas parciais das equações de potência em relação às variáveis de estado do sistema. O ângulo de fase dos geradores PV é representado por $\Delta \theta_{PV}$ e, finalmente, ΔP_{PQ} e ΔV_{PQ} representam respectivamente os ângulos de fase e os módulos das tensões das barras PQ a serem calculados. A matriz Jacobiana é detalhada a seguir:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Existem diversos métodos para resolução iterativa de (2.3), no entanto tem-se utilizado o método de Newton-Raphson e suas variações [32]. A grande característica do método de Newton é a convergência quadrática, quanto mais se aproxima da solução, mais rápida será a convergência.

¹ Também designada como barra de folga, slack ou swing.

O fluxo de carga é utilizado para se obter as condições iniciais para estudos de estabilidade, como estabilidade transitória e estabilidade em regime permanente. Além disso, ele pode ser utilizado para o estudo da estabilidade de tensão, que é visto a seguir.

2.3. ESTABILIDADE DE TENSÃO

A estabilidade de um SEP pode ser definida como a capacidade que um sistema em equilíbrio tem de atingir um segundo estado de equilíbrio quando submetido a uma situação de perturbação sem que haja variação significativa de suas principais variáveis [1]. Uma perturbação pode ser um desligamento de uma unidade geradora, um curto-circuito em uma linha de transmissão, uma variação de carga etc.

O fenômeno de estabilidade é um problema global do sistema e deve ser avaliado conjuntamente com suas propriedades de equilíbrio dinâmico. Desta forma, a modelagem do comportamento dinâmico do SEP deve ser representado por meio de equações algébrico-diferenciais [3, 33]. A estabilidade de um sistema de potência pode ser avaliada diante de diversas grandezas (ângulo, frequência e tensão), dependendo da natureza da perturbação e do período envolvido para a perturbação [1,3,7]. A inclusão ou separação de determinadas características como tempo de avaliação, a instabilidade envolvida, componentes a serem considerados (dependendo da velocidade de atuação) determinará o grau de detalhamento a ser aplicado na análise do sistema e as ferramentas a serem aplicadas, de acordo com o fenômeno a ser avaliado.

O assunto estabilidade de tensão tomou importância devido a ocorrências de incidentes deste tipo nos principais países industrializados, inclusive no Brasil [3,4,5]. A estabilidade de tensão representa a capacidade que o sistema tem de manter as tensões em todas as barras do sistema em níveis aceitáveis após uma perturbação, considerando que ele estava operando em condições satisfatórias na situação pré-perturbação [1,3,7].

Quando o sistema, após a perturbação, passa a encaminhar para uma progressiva e incontrolável queda de tensão, diz-se que o sistema sofreu uma instabilidade de tensão [34].

A ocorrência de instabilidade de tensão pode levar parte do sistema a níveis de tensão muito baixos, podendo de propagar para a totalidade do sistema processo esse denominado por colapso de tensão [4,7]. Assim, este é um fenômeno local que pode se espalhar pela vizinhança [3, 24]. O tempo transcorrido desde o distúrbio inicial até o colapso de tensão pode variar desde uma fração de segundo até dezenas de minutos [4].

O problema de colapso de tensão está intimamente ligado a situações quando o SEP está operando com níveis de carga muito elevados, com condições extremas de exploração, e o sistema de potência perde a habilidade de manter o balanço apropriado de potência reativa e manter um suporte adequado de tensão através do sistema [1,7]. Quando o transporte de energia reativa numa determinada região elétrica se torna mais difícil, com as linhas excedendo sua capacidade de transporte, qualquer solicitação adicional de potência pode provocar colapso de tensão.

Exemplo utilizando um sistema de duas barras

Para auxiliar no entendimento do problema de estabilidade de tensão, será apresentado um exemplo de um sistema elétrico com duas barras [4], composto por um gerador sem limites de geração de potência ativa e reativa alimentando uma carga $P + jQ$ através de um linha de transmissão, cujo limite térmico não será considerado. O sistema é exemplificado na Figura 2.1:

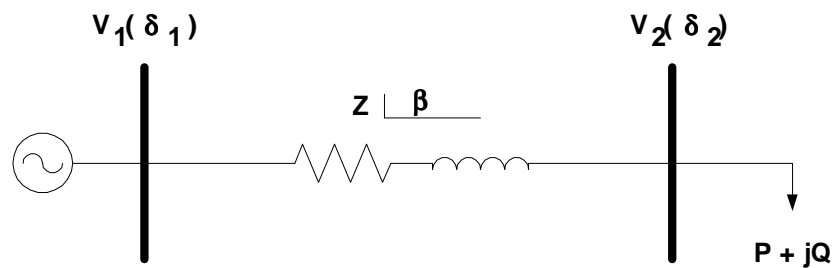


Figura 2.1: Sistema de duas barras

As equações de fluxo de carga representativas deste sistema são mostradas nas equações (2.5) e (2.6).

$$P_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} \cos(\delta_2 - \delta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \cos(\beta) \quad (2.5)$$

$$Q_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} \sin(\delta_2 - \delta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \sin(\beta) \quad (2.6)$$

A partir destas equações pode-se esboçar o gráfico a seguir para diferentes valores de V e δ (tensão e ângulo, respectivamente, na barra 2), para diferentes valores de carga com o fator de potência constante onde os pontos de equilíbrio são representados pelas intersecções das curvas. Os valores de carregamento são de tal forma que $P_1 < P_2 < P_3$ e $Q_1 < Q_2 < Q_3$. De acordo com o carregamento o sistema de equações pode assumir os seguintes comportamentos:

- ✓ Na intersecção de P_1 e Q_1 o sistema tem duas soluções nos pontos w_1 e w_1' ;
- ✓ No ponto de tangenciamento P_2 e Q_2 o sistema tem uma solução no ponto w_2 .
- ✓ Para o carregamento P_3 e Q_3 não há pontos de intersecção e o sistema não possui solução.

Através do gráfico é possível observar que há um limite de transferência de potência e a partir daquele ponto não há mais soluções para o sistema. O ponto de tangenciamento das curvas P_2 e Q_2 representa a máxima carga que pode ser transferida pelo o sistema.

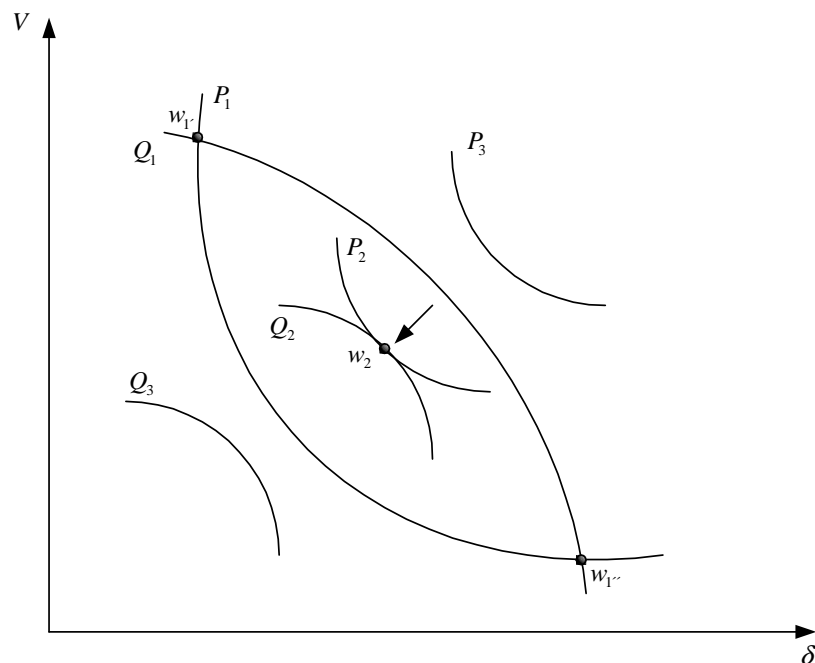


Figura 2.2: Equilíbrio em três carregamentos (sistema de duas barras).

Matematicamente, no ponto w_2 , significa que os vetores gradientes ∇P e ∇Q estão alinhados de forma que pode ser assumida a seguinte relação:

$$\nabla P = \alpha \nabla Q \quad (2.7)$$

onde α é um escalar.

Definindo as variações incrementais de P e Q como:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V \quad (2.8)$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V \quad (2.9)$$

Os vetores gradientes de P e Q assumirão a seguintes formas:

$$\nabla P = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\nabla Q = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

E a partir da equação (2.7) tem-se:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} - \alpha \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} - \alpha \frac{\partial Q}{\partial V} = 0 \quad (2.13)$$

O *Jacobiano* do sistema do fluxo de carga é dado pela equação (2.4), repetida abaixo:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Desta forma, a solução dos equações (2.12) e (2.13) requer que a o determinante da matriz jacobiana do fluxo de potência nulo, ou seja:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \frac{\partial Q}{\partial V} - \frac{\partial P}{\partial V} \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (2.15)$$

Ou seja, no ponto de máximo carregamento o Jacobiano é singular. O jacobiano tornar-se singular no ponto de máximo carregamento traz informações importantes quanto ao limite de estabilidade de tensão. A singularidade da matriz jacobiana implica em que haja pelo menos um autovalor nulo, apresentando-se como uma importante ferramenta para desenvolvimento de índices de avaliação de estabilidade, assunto este que é explorado no decorrer deste trabalho.

A identificação do ponto de singularidade da matriz *Jacobiana* pode ser uma tarefa espinhosa, caso a mesma esteja associada a um sistema de grande dimensão. O emprego

de autovalores pode simplificar esta tarefa, e por esta razão, sua teoria é brevemente descrita a seguir.

2.4. AUTOVALORES E AUTOVETORES

Considere o sistema linear descrito pela equação (2.16).

$$\dot{x} = Ax \quad (2.16)$$

Este sistema linear possui apenas uma solução [35]. Os autovalores μ da matriz de estados A definem a estabilidade do sistema e são dados por:

$$\det(A - \mu I) = 0 \quad (2.17)$$

onde I é uma matriz identidade de ordem n e $\det(\cdot)$ representa o determinante. Se todos os autovalores de A tiverem parte real negativa, o equilíbrio é assintoticamente estável. Se pelo menos um autovalor apresentar parte real positiva, o equilíbrio é instável. Mais detalhes sobre a técnica dos autovalores podem ser encontrados em [36, 37].

Em sistemas elétricos a modelagem é realizada através de sistemas de equações não-lineares. Os sistemas não-lineares podem apresentar múltiplas soluções, uma ou até mesmo nenhuma solução. A matriz associada ao sistema elétrico é o Jacobiano das equações diferenciais do sistema, linearizado² em torno de um ponto de equilíbrio x_0 [35]:

$$\Delta\dot{x} = J\Delta x \quad (2.18)$$

onde o *Jacobiano* J é dado por:

$$J = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} \quad (2.19)$$

Analogamente a sistemas lineares, o equilíbrio do ponto x_0 é definido pelos autovalores da matriz *Jacobiana* do sistema, isto é, o ponto de equilíbrio x_0 é assintoticamente estável se todos os autovalores da matriz J possuírem parte real negativa. Pontos de equilíbrio estáveis também são conhecidos como *nós estáveis* ou simplesmente *nós*. No

² Considera-se apenas o primeiro termo da expansão em série de Taylor.

caso de pelo menos um autovalor possuir parte real positiva enquanto os demais possuírem parte real negativa, o ponto de equilíbrio x_0 é dito instável. Este ponto é conhecido como *ponto de sela*. Se todos os autovalores da matriz de estados possuírem parte real positiva este é denominado *nó instável* ou *fonte*.

Quando um ou mais autovalores apresentarem parte real nula, não há informação sobre a estabilidade do sistema e este apresenta uma bifurcação. Uma bifurcação representa uma mudança qualitativa no sistema conforme um parâmetro é variado [11,31]. À medida que o sistema é carregado lentamente, a partir de um ponto de equilíbrio estável (nó), a parte real dos autovalores da matriz Jacobiana aproxima-se de zero pela esquerda. Quando um destes autovalores se torna nulo a bifurcação ocorre e, a partir desta carga crítica, não há mais pontos de equilíbrio e o Jacobiano deixa fazer sentido já que ele descreve a linearização do sistema em torno de um ponto de equilíbrio.

Ademais, a cada autovalor μ_i ($i=1, 2, \dots, n$) tem-se associado um autovetor à direita (v_i) e um autovetor à esquerda (w_i):

$$Av_i = \mu_i v_i \quad (2.20)$$

$$w_i^T A = \mu_i w_i \quad (2.21)$$

estes autovetores são ortonormais entre si, ou seja:

$$w_i^T v_j = 0, \text{ para todo } i \neq j \quad (2.22)$$

$$w_i^T v_j = 1, \text{ para todo } i = j \quad (2.23)$$

Definindo as matrizes:

$$V = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n] \quad (2.24)$$

$$W = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n]^T \quad (2.25)$$

$$\Lambda = \text{diag}(\mu_1 \quad \mu_2 \quad \dots \quad \mu_n) \quad (2.26)$$

Tem-se que:

$$\begin{aligned}
\Lambda &= V^{-1}AV \\
&= WAW^{-1} \\
&= WAV
\end{aligned}
\tag{2.27}$$

De forma a eliminar o acoplamento entre as variáveis de estado, um novo vetor z é definido a partir de Δx como:

$$\Delta x = Vz \tag{2.28}$$

E desta forma tem-se:

$$\dot{z} = \Lambda z \tag{2.29}$$

A equação (2.29) é composta por n equações diferenciais de primeira ordem, cuja solução em relação ao tempo é dada por:

$$z_i(t) = z_i(0)e^{\mu_i t} \tag{2.30}$$

Aplicando a transformação (2.28) para cada $i, (i=1, 2, \dots, n)$, obtém-se:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n e^{\mu_i t} v_i w_i^T x_0 \tag{2.31}$$

Se a condição inicial x_0 for colinear a um autovetor à direita v_i , ou seja:

$$x_0 = av_i \tag{2.32}$$

a equação (2.31) pode ser reescrita como:

$$x(t) = ae^{\mu_i t} (w_i^T v_i) v_i = be^{\mu_i t} v_i \tag{2.33}$$

A equação (2.33) demonstra a propriedade invariante do autovetor à direita. Além disso, se μ_i tem parte real negativa, a trajetória de $x(t)$ dada pela equação (2.33) tende a se aproximar do ponto de equilíbrio, uma vez que

$$e^{\mu_i t} \rightarrow 0 \text{ quando } t \rightarrow \infty$$

Similarmente, a trajetória de $x(t)$ tende a infinito quando há um autovalor com parte real positiva.

Da equação (2.28) tem-se que:

$$\Delta x(t) = Vz(t) \quad (2.34)$$

e

$$z(t) = W\Delta x(t) \quad (2.35)$$

Isto mostra que o autovetor à direita apresenta a influência de cada variável em um modo de oscilação e o autovetor à esquerda identifica a combinação de variáveis que mais influenciam em um modo de oscilação. Desta forma pode-se analisar para um determinado ponto de equilíbrio quais variáveis de estado são mais sensíveis à perturbação no sistema e quais variáveis de estado mais influenciam para esta perturbação.

2.5. BIFURCAÇÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS

O colapso de tensão é um fenômeno tipicamente não-linear cabendo, assim, a aplicação de técnicas de análise não lineares para avaliação do problema, como a teoria das bifurcações. Uma bifurcação representa uma mudança qualitativa no sistema não-linear conforme um parâmetro é variado [11,31], oferecendo informações sobre a estabilidade do sistema analisado.

Seja o sistema não-linear descrito pela equação (2.36)

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.36)$$

onde \mathbf{x} é um vetor de dimensão n composto pelas variáveis de estado do sistema e u o vetor de dimensão k composto pelos parâmetros que levam o sistema de um ponto de equilíbrio a outro. Deve-se observar que o vetor de parâmetros não faz parte das variáveis de estado do sistema. Para cada valor de u há um ponto de equilíbrio definido por:

$$f(x_0, u) = 0 \quad (2.37)$$

Na teoria das bifurcações admite-se que os parâmetros do sistema variem lentamente e seu principal objetivo é estudar o sistema no limite da instabilidade. Entre as

bifurcações pode-se citar a transcritical, forquilha, sela-nó e a de Hopf. Em SEP tem-se a ocorrência mais comum da Bifurcação de Hopf e a sela-nó. Considerando um modelo dinâmico do sistema, ambas podem ser identificadas, no entanto, se é aplicado o modelo de fluxo de carga (estático), somente a bifurcação sela-nó pode ser detectada devido às restrições impostas pela modelagem estática do sistema.

Na bifurcação sela-nó, o ponto de operação estável (equilíbrio estável) desaparece e a consequência é o colapso dinâmico dos estados do sistema [30]. No Sistema Elétrico este colapso pode causar um colapso de tensão. Assim, é interessante estudar este tipo de colapso de forma a entendê-lo e evitar esses possíveis colapso de tensão.

Através do sistema não-linear exemplificado pela equação (2.38) é possível descrever a bifurcação sela-nó [5].

$$\dot{x} = \lambda - x^2 \quad (2.38)$$

onde $u = [\lambda]$ é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro. A solução deste sistema é dada por:

$$x = \pm\sqrt{-\lambda} \quad (2.39)$$

Considerando o ponto de equilíbrio ($\dot{x} = 0$), conforme a variação do parâmetro λ é possível traçar o gráfico da Figura 2.3. Pode-se observar as seguintes possibilidades de solução:

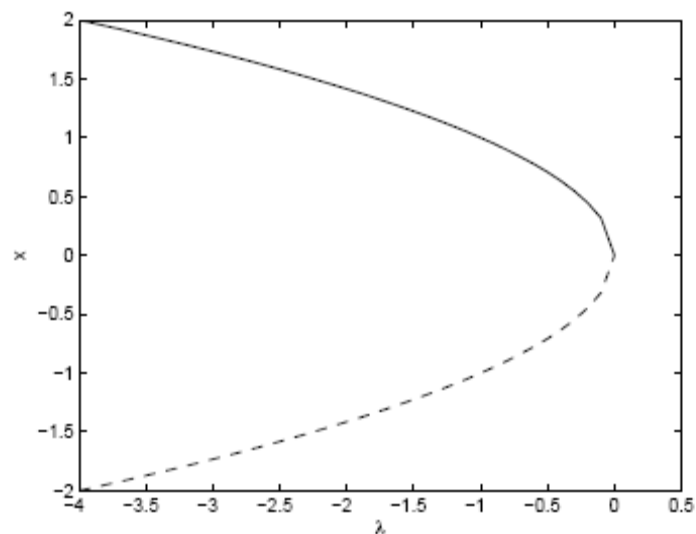


Figura 2.3: Exemplo de Bifurcação Sela-Nó Através da Equação 2.30

- ✓ Para $\lambda < 0$, não existe ponto de equilíbrio fixo;
- ✓ Para $\lambda = 0$, existe um ponto de equilíbrio fixo;
- ✓ Para $\lambda > 0$, existem dois pontos de equilíbrio fixo.

Conforme λ se aproxima pela esquerda, a equação (2.17) possui um ponto de equilíbrio instável (sela) e um ponto de equilíbrio estável (nó). Na bifurcação, onde $\lambda = 0$, o único ponto de equilíbrio apresenta características tanto do ponto de sela como do ponto de nó.

2.6. MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

O Método da Continuação é utilizado para traçar o caminho de um sistema a partir de um ponto de equilíbrio estável até o seu colapso [11]. O modelo de equação utilizado para descrição do método é dado pela equação (2.36). Há dois passos que movem o sistema:

Passo previsor: considerando que seja conhecido o primeiro ponto de equilíbrio, a equação (2.36) é reescrita como:

$$\dot{x} = f(x_0, u_0) \quad (2.40)$$

Derivando-se a equação (2.40) em relação a \mathbf{x} e a \mathbf{u} obtém-se:

$$D_x f(x_0, u_0) \frac{dx}{du} + \frac{\partial f(x_0, u)}{\partial u} = 0 \quad (2.41)$$

O vetor tangente pode ser definido como um rearranjo da equação (2.41).

$$VT_0 = \frac{dx_0}{du} = -D_x f(x_0, u_0)^{-1} \frac{\partial f(x_0, u)}{\partial u} \quad (2.42)$$

Onde $D_x f(x_0, u_0)$ são as derivadas de $f(x, u)$ em relação às variáveis de estado \mathbf{x} no ponto (x_0, u_0) .

O passo gerado pelo revisor é:

$$\frac{\Delta x_0}{\Delta u_0} = VT_0 \quad (2.43)$$

Considerando:

$$\Delta u_0 = \frac{k}{\|VT_0\|} \quad (2.44)$$

Pode-se normalizar o tamanho do passo. A constante k é utilizada para acelerar ou retardar o processo até o ponto de bifurcação.

Substituindo a equação (2.44) na equação (2.43), obtém-se:

$$\Delta x_0 = k \frac{VT_0}{\|VT_0\|} \quad (2.45)$$

Desta forma, quanto mais inclinada for a curva que descreve o caminho até a bifurcação, menor será o passo previsor, ou seja, a medida que se aproxima da bifurcação, menores serão os passos aplicados. Esta propriedade se torna importante pois no início do processo aplica-se passos mais longos e próximo à bifurcação são aplicados passos cada vez menores, produzindo ganhos de tempo computacional.

Passo Corretor: O objetivo do passo previsor é estabelecer uma solução para (x_1, u_1) a partir do ponto $(x_0 + \Delta x_0, u_0 + \Delta u_0)$, gerado pelo passo previsor. Resolvendo-se as equações abaixo pode-se obter a solução do sistema.

$$\begin{aligned} f(x_0, u_0) &= 0 \\ \rho(x_0, u_0) &= 0 \end{aligned} \quad (2.46)$$

Considerando que o passo previsor e o passo corretor são perpendiculares, tem-se:

$$\rho(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_0 - \Delta x_0 \\ x_1 - x_0 - \Delta x_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.47)$$

A partir da solução obtida no passo previsor, as equações acima convergem para (x_1, u_1) .

A desvantagem deste método é o alto esforço computacional necessário para resolução de sistemas de grande porte, especialmente se este cálculo se fizer necessário para uma grande quantidade de cenários operativos.

Uma maneira alternativa e eficaz é executar o Passo Corretor utilizando um fluxo de potência com as condições iniciais definidas pelo Passo Previsor. O sistema converge rapidamente.

A Figura 2.4 ilustra o funcionamento do método.

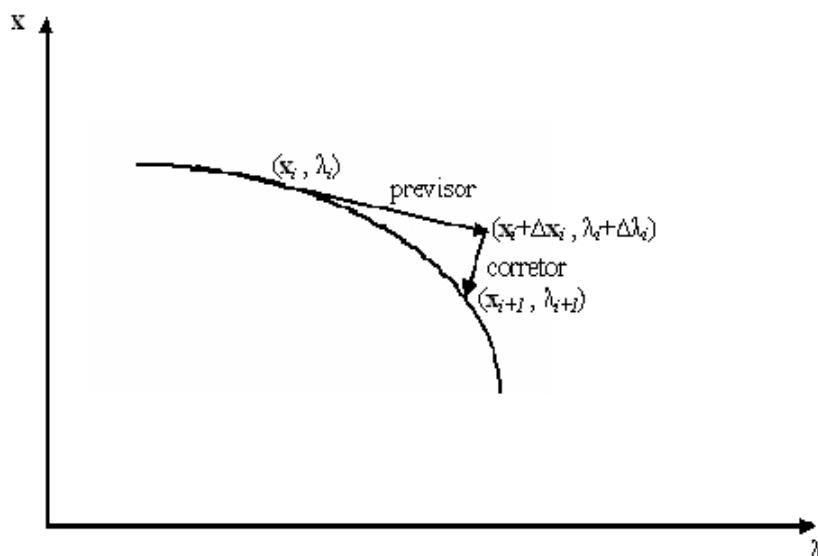


Figura 2.4: Método da Continuação

O Método da Continuação foi descrito matematicamente em [11] e aplicado em sistemas de potência em [6,12,38,39]. Este método é muito utilizado para obtenção do ponto de bifurcação do sistema, onde o parâmetro u considerado é o aumento de carga e geração.

Considerando novamente as equações do fluxo de potência (2.3), para um incremento de carga do sistema $u = [\lambda]$, sendo considerado como $(1+\Delta\lambda)$, tem-se:

$$P^{esp} = (1 + \lambda)P_0 \quad (2.48)$$

$$Q^{esp} = (1 + \lambda)Q_0 \quad (2.49)$$

onde P_0 e Q_0 são as potências ativas e reativas iniciais do sistema. Rearranjando as equações acima tem-se:

$$\Delta P = \lambda P_0 \quad (2.50)$$

$$\Delta Q = \lambda Q_0 \quad (2.51)$$

Substituindo as equações (2.50) e (2.51) na equação (2.3):

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Desta forma, a equação (2.52) representa o vetor tangente quando o parâmetro é o crescimento da geração/carga. O incremento de carga é dado por:

$$\lambda = \frac{k}{\|VT\|} \quad (2.53)$$

Desta forma é aplicado o Passo Previsor incrementando-se a carga através das equações (2.48) e (2.49). O Passo Corretor se resume em calcular o fluxo de carga utilizando como condição inicial o Passo Previsor.

O cálculo deste vetor é facilmente incorporado em qualquer programa de fluxo de carga convencional. Logo, sua facilidade de obtenção constitui uma grande vantagem em relação a outros métodos. Uma outra facilidade da utilização do vetor tangente é o fato

da maior componente deste vetor indicar a barra mais sensível, isto é, uma pequena variação de carregamento provoca grandes variações de tensões e ângulos.

Além disto, a referência [40] mostra que o vetor tangente converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo. A referência [41] mostra que a maior componente no autovetor à direita indica a variável mais sensível no ponto de singularidade. Este assunto é explorado neste trabalho.

2.7. SISTEMAS DE EQUAÇÕES ALGÉBRICO-DIFERENCIAIS

O sistema de equações algébrico-diferenciais (EAD) é um sistema que contempla o conjunto de restrições algébricas as quais podem estar sujeito um sistema de equações diferenciais, representando os limites de um sistema físico. O sistema de EDO é representado por:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, y, u) \\ 0 &= g(x, y, u)\end{aligned}\tag{2.54}$$

onde x é um vetor com as n variáveis de estado, y é um vetor com as m variáveis algébricas e u é o vetor com os k parâmetros.

Para análise de EAD é bastante utilizada o *teorema da função implícita*, que diz que existe uma função continuamente diferenciável³, na qual as variáveis algébricas foram eliminadas e é localmente única, descrita por:

$$\dot{x} = F(x, u)\tag{2.55}$$

Existe uma única solução no tempo para a EAD (2.54) em cada um desses pontos, levando-se em consideração que F é definida e suave em todos os pontos onde $D_y g$ não é singular [42].

³ Também conhecida como função suave

Considerando-se um valor fixo para o parâmetro u , o equilíbrio da EAD (2.54) é representado por:

$$\begin{aligned} f(x, y, u) &= 0 \\ g(x, y, u) &= 0 \end{aligned} \tag{2.56}$$

Pode-se analisar a estabilidade de uma EAD, similarmente que a EDO, através da linearização de (2.54) nas redondezas de um ponto de equilíbrio.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = J_{total} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \tag{2.57}$$

onde:

$$J_{total} = \begin{bmatrix} D_x f & D_y f \\ D_x g & D_y g \end{bmatrix} \tag{2.58}$$

Se $D_y g$ não for singular, Δy pode ser eliminado de (2.57), ou seja:

$$\Delta \dot{x} = [D_x f - D_y f \cdot D_x g \cdot D_y g] \Delta x \tag{2.59}$$

Pode-se considerar:

$$A_{sys} = D_x f - D_y f \cdot D_x g \cdot D_y g \tag{2.60}$$

onde A_{sys} é a matriz de estados do sistema. Para um dado vetor de parâmetros u , a estabilidade em um ponto de equilíbrio da EAD (2.54) depende dos autovalores da matriz de estados A_{sys} . Conforme o conjunto de parâmetros é variado a EAD (2.54) pode apresentar bifurcações, da mesma forma que as EDOs. Conforme a fórmula de Schur, para um $D_y g$ não singular, tem-se:

$$\det(J_{total}) = \det(A_{sys}) \det(D_y g) \tag{2.61}$$

Isto leva à uma conclusão relevante, que a matriz de estados A_{sys} se torna singular ao mesmo tempo que a matriz não reduzida J_{total} .

2.8. VETOR TANGENTE E AUTOVETORES

A facilidade de implementação do vetor tangente à direita no fluxo de carga e sua convergência para o autovetor à direita, associado ao autovetor nulo, traz grande vantagem para aplicação de análise de sensibilidade no sistema. A análise de sensibilidade é uma importante ferramenta para identificação das variáveis de estado críticas do sistema que o levam à instabilidade de tensão e das variáveis de estado que representam os mais eficazes controles para afastar este sistema da instabilidade.

Considerando-se o parâmetro u da equação(2.42) , que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro, como sendo o aumento de carga $\Delta\lambda$, obtém-se o vetor tangente genérico descrito pela equação seguinte:

$$VT = -D_x^{-1} f(x, \lambda) \frac{\partial f(x, \lambda)}{\partial \lambda} \quad (2.62)$$

As derivadas parciais de $f(x, \lambda)$ em relação ao crescimento da carga, conforme descrito para o passo predictor do Método da Continuação, representam o vetor de potência especificadas em cada barra do sistema.

Uma outra abordagem para cálculo do VT é mostrada por Souza em [43], levando em consideração características de diferenciação analítica e diferenciação numérica das variáveis do sistema, analisadas em [44]. Souza mostra que o vetor das derivadas parciais de $f(x, \lambda)$ em relação ao crescimento da carga para o VT pode ser substituído pelo erro da solução convergida do fluxo de potência. Assim, a equação do VT pode ser reescrita como:

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = J^{-1} [erro] \quad (2.63)$$

Multiplicando-se a equação (2.63) por J^{-1} , tem-se:

$$J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = J^{-1} J^{-1} [erro] \quad (2.64)$$

O lado esquerdo da equação (2.64) pode ser interpretado como uma única iteração do *Método Inverso da Potência*, utilizado para cálculo do menor autovalor associado a uma matriz quadrada [45]. Métodos de translação podem ser utilizados para o cálculo dos demais autovalores.

Considerando que o vetor tangente converge para o autovetor à direita, a equação seguinte é interpretada como um *VT* refinado por uma iteração do *Método Inverso da Potência*.

$$VT = J^{-1} J^{-1} [erro] \quad (2.65)$$

Adicionalmente, a análise do vetor tangente pode ser estendida ao autovetor à esquerda. Na Seção 2.4 foi apresentado que o autovetor à esquerda identifica a combinação de variáveis que mais influenciam em um modo de oscilação. Assim, o autovetor à esquerda, associado ao autovetor nulo, pode ser utilizado para identificação das variáveis de estado que mais efetivamente podem ser utilizadas para realização de ações de controle, afastando o sistema da instabilidade.

Segundo as condições de transversalidade para a bifurcação sela-nó [11]

$$D_x f|_0^T \cdot w_0 = D_x f|_0 \cdot v_0 = 0 \quad (2.66)$$

Considerando-se o *VT* na equação (2.66), tem-se:

$$D_x f|_0^T \cdot VT_w = D_x f|_0 \cdot VT \quad (2.67)$$

reescrevendo a equação (2.67):

$$VT_w = (D_x f|_0^T)^{-1} D_x f|_0 \cdot VT \quad (2.68)$$

Aplicando-se a aproximação do autovetor à direita em relação ao vetor tangente:

$$VT = D_x f^{-1} \cdot D_x f^{-1} \cdot [erro] \quad (2.69)$$

ou ainda:

$$VT_w = (D_x f^T)^{-1} \cdot D_x f^{-1} \cdot [erro] \quad (2.70)$$

Finalmente, tem-se:

$$VT_w = (J^T)^{-1} \cdot J^{-1} \cdot [erro] \quad (2.71)$$

A equação (2.70) define a aproximação do autovetor à esquerda, associado ao autovetor nulo, através do VT_w . Assim, propõe-se o uso do VT_w como ferramenta para determinar ações de controle no sistema, apontando as variáveis de estado que são mais eficientes na aplicação de controle.

Deve-se levar em consideração que o VT aponta a sensibilidade baseada no Jacobiano do fluxo de carga. Assim, a formulação do fluxo de carga e as variáveis de estado contempladas no modelo são de suma importância para análise de sensibilidade.

Na formulação do fluxo de carga são feitas algumas preposições tal como assumir que os geradores podem manter a tensão terminal na barra independentemente do carregamento do sistema. Além disso, o comportamento transitório do gerador depende das características dinâmicas da máquina síncrona e seus sistemas de controle, ignorados no fluxo de carga convencional. Essas limitações são discutidas na seção seguinte.

2.9. LIMITAÇÃO DO FLUXO DE CARGA

No estudo de estabilidade de tensão é preciso se traçar o caminho de um sistema a partir de um ponto de equilíbrio até seu colapso na detecção do limite de estabilidade, determinando seu ponto operativo a cada variação do parâmetro u . Contudo, deve-se considerar que algumas simplificações são aplicadas na formulação do fluxo de carga convencional, podendo camuflar o verdadeiro motivo pelo qual o sistema é levado ao colapso.

Na Seção 2.2 foi apresentada a formulação do fluxo de carga e apontado que são realizadas algumas considerações para se determinar o ponto operativo do sistema. É assumido que os geradores são capazes de manter sua tensão terminal fixa. No entanto, conforme a carga do sistema aumenta ou na ocorrência de alguma perturbação pode ser que isto não ocorra de fato. Também é considerado que a barra *swing* ajuste toda a perda do sistema.

Os limites podem ser implementados diretamente na formulação do fluxo de carga. Assim, a variável deve ser fixada e um novo ponto de operação é obtido. Quando o sistema está carregado pode-se encontrar dificuldade na obtenção da solução, sendo necessária a repetição do processo diversas vezes. No entanto, mesmo depois de encontrada uma solução, a análise da solução do Fluxo de Carga no ponto operativo pode ser diferente do real, considerando-se que a representação do gerador no fluxo de carga é diferente da sua representação na análise dinâmica.

Para a representação do comportamento transitório do gerador deve-se levar em consideração as características dinâmicas da máquina síncrona e seus respectivos sistemas de controle. Estas características não são consideradas para as barras *Swing* e PV na formulação do fluxo de carga.

A próxima seção apresenta a formulação completa do sistema elétrico e o estudo do seu ponto de equilíbrio, buscando contornar o problema apresentado.

2.10. MODELO COMPLETO DO SISTEMA

A estabilidade do sistema elétrico de potência está intimamente ligada à dinâmica da máquina síncrona, uma vez que esta é a principal fonte de energia do sistema. Desta forma, um modelo adequado para análise dinâmica do sistema elétrico deve contemplar a dinâmica da máquina síncrona.

No modelamento do sistema elétrico é assumido que se tenha nb barras e ng geradores. Cada gerador está associada a uma dinâmica de comportamento. Adicionalmente, cada gerador possui um regulador de tensão e um regulador de velocidade. Neste trabalho assume-se que todos os geradores estão associados aos mesmos modelos de regulador. A seguir é apresentada a formulação dinâmica da máquina síncrona, que virá a compor a representação completa do sistema elétrico para estudos de estabilidade.

2.10.1. GERADOR SÍNCRONO

De forma a simplificar a análise para sistemas de grande porte, os modelos de geradores são desenvolvidos ignorando-se os transitórios elétricos do estator [3,33]. Desta forma, as equações diferenciais do modelo de dois eixos que descreve o comportamento dinâmico da máquina síncrona é dado por:

$$\dot{\delta}_i = (\omega_i - \omega_m)\omega_0 \quad (2.72)$$

$$\dot{\omega}_i = M_i^{-1} [P_{m_i} - D_i(\omega_i - \omega_m) - (E_{q_i} - X'_{d_i} I_{d_i}) I_{q_i} - (E_{d_i} - X'_{q_i} I_{q_i}) I_{d_i}] \quad (2.73)$$

$$\dot{E}_{q_i} = T_{d_{o_i}}^{-1} [E_{fd_i} - E_{q_i} - (X_{d_i} - X'_{d_i}) I_{d_i}] \quad (2.74)$$

$$\dot{E}_{d_i} = T_{q_{o_i}}^{-1} [-E_{d_i} + (X_{q_i} - X'_{q_i}) I_{q_i}] \quad (2.75)$$

onde ω_m representa a referência do sistema., ω_0 é a frequência do sistema (377 rad/s) e ω_i é a frequência do gerador. E_{d_i} , E_{q_i} , I_{d_i} e I_{q_i} são as, respectivamente, tensões e correntes transitórias de eixo direto e em quadratura. Os parâmetros X_{d_i} e X_{q_i} são as reatâncias de eixo direto e em quadratura e X'_{d_i} , X'_{q_i} , $T_{d_{o_i}}$, $T_{q_{o_i}}$ são as reatâncias e constantes de tempo transitória de eixo direto e em quadratura, respectivamente. Finalmente, D_i é o coeficiente de amortecimento e M_i a constante de tempo de inércia do gerador.

A interface entre o gerador e a rede é dada pelas seguintes equações:

$$E_{q_i} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - R_s I_{q_i} - X'_{d_i} I_{d_i} = 0 \quad (2.76)$$

$$E_{d_i} - V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - R_s I_{d_i} - X'_{q_i} I_{q_i} = 0 \quad (2.77)$$

Onde R_s é a resistência de armadura da máquina. Pode-se observar que as equações (2.76) e (2.77) podem ser resolvidas em termos de I_{d_i} e I_{q_i} e seus valores substituídos nas equações (2.73), (2.74) e (2.75).

2.10.2. REGULADOR DE TENSÃO

O sistema de excitação da unidade geradora tem como função alimentar o enrolamento de campo da máquina síncrona e estabelecer funções de proteção e controle.

Neste trabalho será utilizado o modelo de sistema de excitação IEEE DC-1 [3], representada pelo diagrama de blocos da Figura 2.4, onde a malha representativa da saturação do circuito de campo é considerada. O V_{PSS} , responsáveis por sinais adicionais que proporcionam amortecimento nas oscilações do sistema, aparece como um sinal adicional junto à referência. Os parâmetros V_{r,max_i} e V_{r,min_i} limitam a tensão de saída do primeiro bloco.

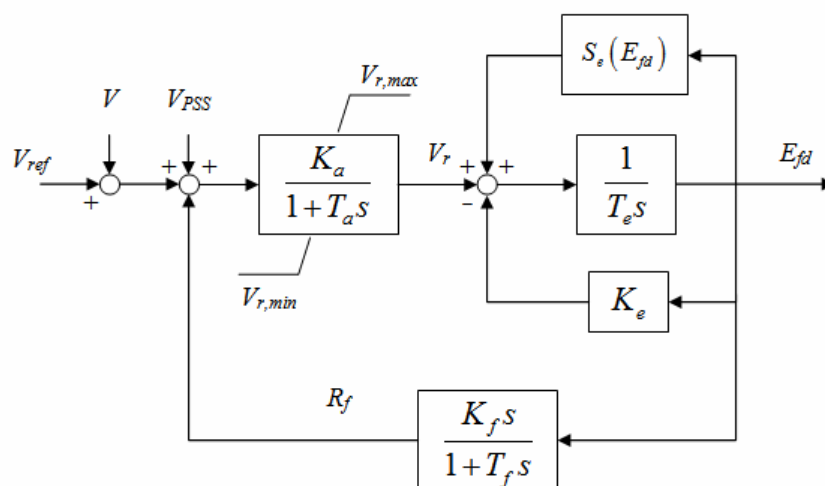


Figura 2.4: Diagrama de blocos do regulador de tensão IEEE-DC1

As equações diferenciais que descrevem o modelo do regulador de tensão são dadas por:

$$\dot{E}_{fd_i} = T_{e_i}^{-1} [V_{r_i} - (K_{e_i} + Se(E_{fd_i}))E_{fd_i}] \quad (2.78)$$

$$\dot{V}_{r_i} = T_{a_i}^{-1} [-V_{r_i} + K_{a_i}(V_{ref} - V_i - R_{f_i})] \quad (2.79)$$

$$\dot{R}_{f_i} = T_{f_i}^{-1} [R_{f_i} + \frac{k_{f_i}}{T_{f_i}} (K_{e_i} + Se(E_{fd_i}))E_{fd_i} + \frac{k_{f_i}}{T_{f_i}} V_{r_i}] \quad (2.80)$$

onde V_i representa o módulo da tensão terminal da máquina síncrona, V_{r_i} é a tensão de saída do regulador de tensão, V_{s_i} é a tensão de saída da malha de estabilização e V_{ref} é a tensão de referência. V_{PSS} representa a tensão adicional estabilizante e é zero em regime permanente, E_{fd_i} é a tensão da máquina síncrona, $Se(E_{fd_i})$ modela a saturação da excitatriz (função de E_{fd_i}). K_{a_i} é o ganho do regulador de tensão, T_{a_i} é a constante de tempo do regulador de tensão, K_{e_i} é o ganho da excitatriz, T_{e_i} é a constante de tempo da excitatriz, K_{f_i} é o ganho da malha de estabilização, T_{f_i} é a constante de tempo da malha de estabilização. Finalmente, $V_{r_{max_i}}$ e $V_{r_{min_i}}$ são os limites superior e inferior de saída do regulador de tensão. Observe que a equação (2.80) somente tem validade quando $V_{r_{max_i}} < V_i < V_{r_{min_i}}$.

2.10.3. REGULADOR DE VELOCIDADE

Utiliza-se neste trabalho o mesmo regulador apresentado em [29], reproduzido na Figura 2.5. Este modelo pode ser utilizado para representar reguladores de turbinas hidráulicas ou térmicas. As equações diferenciais abaixo representam o modelo:

$$\dot{P}_{m_i} = T_{ch_i}^{-1} [\omega_i - P_{m_i}] \quad (2.81)$$

$$\dot{\omega}_i = T_{g_i}^{-1} [P_{g_{s_i}} - \frac{(\omega_i - \omega_{ref})}{R_i} - \omega_i] \quad (2.82)$$

$$P_{gs_i} = P_{gs_0_i} (1 + \lambda) \quad (2.83)$$

onde P_{mi} é a potência ativa gerada e ω modela a quantidade de água ou vapor que aciona a turbina. A constante R_i modela a perda inerente de velocidade da turbina e T_{ch_i} e T_{ch_i} são as constantes de tempo relativas ao regulador de velocidade.

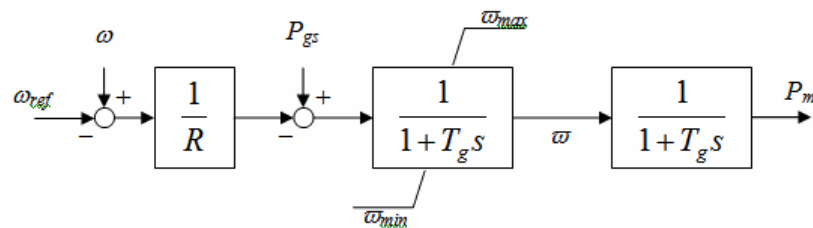


Figura 2.5: Diagrama de blocos do regulador de velocidade

2.10.4. MODELOS DE CARGA

No estudo de estabilidade de sistemas elétricos, diversos modelos podem ser utilizados. Pode-se considerar a carga como dependente da tensão e da frequência, ou impedância constante. Estes modelos geralmente são não lineares [29]. Existem outros modelos que consideram a dinâmica da carga [46]. Uma combinação desses modelos também é possível de ser aplicada.

O modelo de carga adotado neste trabalho será o de potência constante de forma a simplificar as análises.. A potência inicial P_{l_i} e Q_{l_i} são mantidas constantes durante o processo de resolução do sistema..

2.10.5. EQUAÇÕES DE REDE

A formulação do fluxo de carga apresentado na Seção 2.2 sofre algumas modificações quando são consideradas as características dinâmicas dos geradores, fazendo com que as potências ativa e reativa de todas as barras sejam incluídas na formulação. Deve-se

considerar ainda que as potências ativas e reativas geradas não são mais especificadas, passando a ser calculadas conforme equações a seguir:

$$P_{g_i} = I_{d_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{q_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) \quad (2.84)$$

$$Q_{g_i} = I_{d_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + I_{q_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \quad (2.85)$$

onde P_{g_i} e Q_{g_i} são as potências despachadas pelo gerador i .

2.10.6. TRANSFORMADORES COMUTADOS SOB CARGA

Os Transformadores Comutados sob Carga (LTC⁴) são equipamentos de atuação lenta e discreta⁵, que têm como função modificar a tensão terminal de seus barramentos através da variação automática de tap. O tap $r : 1$ do transformador é modificado se o erro em relação à tensão de referencia estiver fora de um intervalo especificado.

Em geral, tanto a resistência quando a reatância de magnetização são desconsideradas para simplificação da análise. A matriz de impedância do modelo do LTC é dada por:

$$Y_{LTC} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

Com

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{LTC}}$$

$$Y_{12} = \frac{1}{rZ_{LTC}}$$

$$Y_{21} = \frac{1}{r^* Z_{LTC}}$$

⁴ Load Tap Changer do inglês

⁵ Não contínua

$$Y_{22} = \frac{1}{|r|^2 Z_{LTC}}$$

onde Z_{LTC} é a impedância do LTC e r^* representa o conjugado do tap r .

2.10.7. MODELO COMPLETO DO SISTEMA ELÉTRICO

Nas Seções de 2.10.1 a 2.10.6 foram apresentados os modelos dos componentes do sistema elétrico que formam um sistema de equações algébrico-diferenciais similar ao discutido na Seção 2.7. Desta forma, o vetor de estados x e de variáveis algébricas y são dados por:

$$x = [\delta, \omega, E_q, E_d, E_{fd}, V_r, R_f, P_{m_i}, \varpi] \quad (2.87)$$

$$y = [\theta, V] \quad (2.88)$$

Os parâmetros u do sistema podem ser definidos como:

$$u = [V_{ref}, \lambda, \dots] \quad (2.89)$$

2.11. MÉTODO DA CONTINUAÇÃO PARA O MODELO COMPLETO DO SISTEMA

A resolução simultânea das variáveis algébricas x e das variáveis dinâmicas y permite estudar um ponto de operação considerando as propriedades dinâmicas do sistema, evitando as aproximações consideradas no fluxo de carga. Desta forma, deve-se resolver o seguinte sistema algébrico-diferencial.

$$\begin{aligned} f(x, y, u) &= 0 \\ g(x, y, u) &= 0 \end{aligned} \tag{2.90}$$

onde \mathbf{f} representa as equações diferenciais da máquina síncrona e dos reguladores de tensão e velocidade. As equações algébricas da rede elétrica são representadas por \mathbf{g} . Deve-se também escolher uma barra de referência angular do sistema já que a barra swing não será mais responsável pela compensação das perdas do sistema. Os ajustes das perdas do sistema passam a ser executadas por meio da interação do regulador de velocidade e as equações de balanço de potência ativa, ajustando a potência ativa gerada P_{g_i} através de P_{m_i} para regular a frequência do sistema. Por outro lado, os reguladores de tensão interagem com as equações de balanço de potência reativa através de E_{fd_i} , para ajustar a potência reativa gerada Q_{g_i} de forma a compensar as perdas reativas e regular a tensão terminal V_i .

A solução da EAD (2.90) também pode ser obtida pelo método de Newton-Raphson, como é feito no fluxo de carga. Assim, a EAD (2.90) define a variedade de equilíbrio do sistema elétrico de potência e a solução do Fluxo de Potência, correspondente a certa condições, é apenas um ponto dessa variedade.

Pode-se estender o Método da Continuação aplicado a sistemas de potência para traçar o ponto de equilíbrio total do sistema definido por (2.90). Então, é preciso obter o ponto de equilíbrio inicial para as máquinas e seus controles a partir da solução do Fluxo de Carga. Desta forma, tem-se:

$$\omega_i = 1 \tag{2.91}$$

$$I_{g_i} e^{j\gamma_i} = \frac{P_{g_i} - jQ_{g_i}}{V_i e^{-j\theta_i}} \tag{2.92}$$

$$I_{d_i} + jI_{q_i} = I_{g_i} e^{(j\gamma_i - \delta_i - \frac{p_i}{2})} \quad (2.93)$$

$$V_{d_i} + jV_{q_i} = V_i e^{(j\theta_i - \delta_i - \frac{p_i}{2})} \quad (2.94)$$

$$E_{fd_i} = X_{d_i} I_{d_i} + V_{q_i} + R_{s_i} I_{q_i} \quad (2.95)$$

$$E_{q_i} = E_{fd_i} - (X_{d_i} - X'_{d_i}) I_{d_i} \quad (2.96)$$

$$E_{d_i} = -(X_{q_i} - X'_{q_i}) I_{q_i} \quad (2.97)$$

$$V_{r_i} = (K_{e_i} + S_e(E_{fd_i})) E_{fd_i} \quad (2.98)$$

$$R_{f_i} = \frac{K_{f_i}}{T_{f_i}} E_{fd_i} \quad (2.99)$$

$$V_{ref} = V_i + \frac{V_{r_i}}{K_{a_i}} \quad (2.100)$$

$$P_{gs_0_i} = \omega_i = P_{g_i} \quad (2.101)$$

A partir do ponto operacional calcula, deseja-se calcular um novo ponto operativo considerando um incremento de carga e de geração. O novo vetor tangente é dado por:

$$VT_{total} = \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q \\ \Delta E_d \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_r \\ \Delta R_f \\ \Delta P_{m_i} \\ \Delta\varpi \\ \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = J_{total}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_{gs_0} \\ P_{l_o} \\ Q_{l_o} \end{bmatrix} \quad (2.102)$$

com:

$$J_{total} = \begin{bmatrix} D_x f & D_y f \\ D_x g & D_y g \end{bmatrix}$$

e desta forma o passo é definido por:

$$\lambda = \frac{k}{\|VT\|} \quad (2.103)$$

Com o tamanho do passo definido, a carga é incrementada e o passo corretor resume-se em a calcular o ponto operacional do sistema através do método de Newton-Raphson.

Repete-se este procedimento até que o sistema atinja seu ponto de sela nó, ou seja, o sistema atinge seu ponto máximo de carregamento.

2.11.1. LIMITES

Nos estudos de estabilidade de sistemas a representação dos limites físicos do sistema é de suma importância. A desconsideração de algum limite ou mesmo a simplificação demasiada do modelo do sistema pode levar o pesquisador a conclusões equivocadas. O colapso de tensão, por exemplo, ocorre geralmente por suprimento local limitado de potência reativa.

Limites do Regulador de Tensão:

A função do Regulador de Tensão é controlar a tensão terminal da barra terminal do gerador síncrono. Assim, ele controla indiretamente o despacho de potência reativa regulando a tensão V_{r_i} do regulador. Ele pode ser calculado para cada ponto operativo a partir da equação (2.78). Na figura pode-se observar que V_{r_i} é limitado entre $V_{r_i,max}$ e $V_{r_i,min}$. Considerando que a potência reativa despachada pela máquina é dada pela equação:

$$Q_{gi} = \frac{V_i E_{fd_i}}{X_{d_i}} \cos(\delta_i - \theta_i) - V_i^2 \left[\frac{1}{X_{d_i}} \cos^2(\delta_i - \theta_i) + \frac{1}{X_{q_i}} \sin^2(\delta_i - \theta_i) \right] \quad (2.104)$$

a tensão V_{r_i} pode ser calculada através do passo predictor do Método da Continuação. No caso de V_{r_i} atingir algum de seus limites, a equação (2.78) é substituída pela equação (2.105) no modelo de equações que define o modelo do sistema.

$$0 = T_{a_i}^{-1} [-V_{r_i, \text{lim}} + K_{a_i} (V_{ref} - V_i - R_{f_i})] \quad (2.105)$$

onde *lim* deve ser substituído por *max* ou *min* dependendo do limite atingido. Assim, nos passos posteriores o regulador de tensão é obrigado a se manter no seu limite atingido.

Limites do Regulador de Velocidade:

Os reguladores de velocidade são responsáveis por regular a geração de potência ativa dos geradores síncronos conforme solicitação da carga. Quando os geradores atingem seu limite máximo de geração de potência ativa $P_{g_i, \text{max}}$ é forçado a permanecer fixado neste limite.

2.12. BIFURCAÇÃO SELA-NÓ NO MODELO COMPLETO DO SISTEMA

Na Seção 2.7 foi abordado que a matriz reduzida A_{sys} , dada por:

$$A_{\text{sys}} = D_x f - D_y f \cdot D_x g^{-1} \cdot D_y g$$

fornece pode ser utilizada para se obter informações sobre a estabilidade a pequenos sinais do ponto de equilíbrio sujeito a pequenas perturbações. De acordo com a equação a equação (2.61) tem-se:

$$\det \begin{bmatrix} D_x f & D_y f \\ D_x g & D_y g \end{bmatrix} = \det(D_x f - D_y f \cdot D_x g \cdot D_y g) = \det(A_{sys}) \det(d_y g)$$

Portanto, se $D_y g$ não for singular, o determinante de A_{sys} se torna zero se, e somente se, o determinante de J_{total} for zero. Assim, detectar a singularidade de A_{sys} é equivalente a detectar a singularidade de J_{total} . Uma vez que A_{sys} e, conseqüentemente, a sua inversa não precisam ser calculadas tem como resultado a redução do esforço computacional na análise de estabilidade do sistema.

A teoria apresentada nesse capítulo será utilizada no próximo capítulo como forma de definir ações de controle para garantir a estabilidade estática do SEP, definidas através de análises de sensibilidade.

No próximo capítulo, serão investigadas ações de controle baseadas na aproximação do autovetor à esquerda (VT_w) definido pela equação (2.49). Além disso, essas ações de controle são comparadas com as ações sugeridas pelo vetor tangente (VT), bastante difundida na literatura.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Neste capítulo são realizadas aplicações numéricas para verificação da metodologia proposta de aproximação do vetor tangente à esquerda, discutida no Capítulo 2, para seleção de ações de controle visando a melhora da estabilidade do sistema. Para isto, é utilizado o Sistema *New England* de 39 barras, retirado de [29]. O sistema de 39 barras, apresentado na Figura 3.1, possui 10 unidades geradoras e 18 barras de carga. Mais detalhes deste sistema são apresentados no Apêndice A.

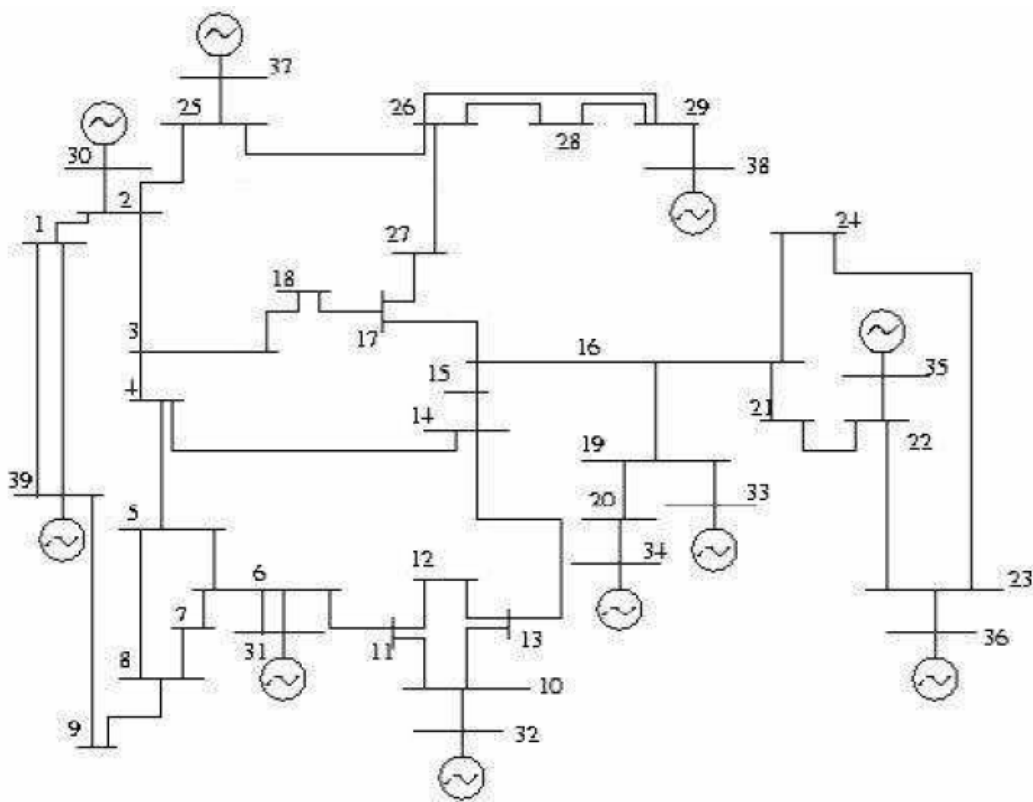


Figura 3.1: Sistema *New England* de 39 barras

Quando um sistema elétrico de potência caminha para a região de instabilidade de tensão, devem-se aplicar ações corretivas para evitar que o processo de instabilidade ocorra [47]. Em situações como esta, algumas ações podem ser satisfatórias na reversão da instabilidade como o chaveamento de capacitores shunt, bloqueio dos LTCs e uma ação drástica de corte de carga. Por exemplo, o bloqueio do tape do LTC diminui a degradação do sistema e permite algum tempo para uma ação posterior, como o corte de carga [30].

Como apontado no capítulo anterior, a literatura mostra que é possível inferir sobre a melhor ação de controle para se evitar o colapso de tensão através do vetor tangente obtido pelo Método da Continuação, que converge para o autovetor à direita relativo ao autovalor crítico no ponto de colapso de tensão. Se a estabilidade de tensão é o objeto de estudo, as barras com maiores variações de tensão são as candidatas a receber compensação de potência reativa.

Foi discutido, também, que o autovetor à esquerda possui informações da variação das equações do sistema – de potência ativa e reativa, no caso do fluxo de carga – em relação ao parâmetro.

Além disso, mostrou-se que, como autovetor à esquerda pode ser obtido através do autovetor à direita, o Vetor Tangente – que converge para o autovetor à direita – é utilizado para se obter uma aproximação do autovetor à esquerda.

Assim, pretende-se identificar ações de controle através de VT_w e compará-las com ações de controles sugeridas por VT .

Portanto, para a análise é aplicada a seguinte metodologia:

- A partir de um ponto operativo o sistema é carregado até seu ponto de colapso de tensão. Para isto é utilizado o Método da Continuação aplicado ao equilíbrio do sistema;
- Para cada ponto de operação obtido pelo Método da Continuação, VT_w é calculado (importante mencionar que VT é obtido para todos os pontos do Método da Continuação);
- No ponto de bifurcação⁶, são identificadas as barras para compensação reativa e corte de carga através de VT e VT_w . As ações são implementadas separadamente e a nova margem de carga é obtida;
- As mesmas ações de controle são identificadas através de VT e VT_w no caso base. As ações de controle são novamente implementadas e a nova margem de carga é obtida;
- Uma discussão acerca dos resultados obtidos é desenvolvida.

3.2. OBTENÇÃO DA MARGEM DE CARGA

Na obtenção da margem de carga original do sistema as variações de carga foram consideradas unidimensionais, ou seja, as cargas crescem na mesma direção com fator de potência constante. Desta forma, considerando a constante de passo do Método da Continuação $k=1$, e o erro de potências ativa e reativa como 10^{-6} pu, a margem de carga do sistema *New England* 39 barras é 1.2945.

⁶ Estas bifurcações podem ocorrer bifurcações antes da sela-nó.

Para se obter as novas margens de carga aplicando-se ações de controle é adotado um processo semelhante ao da margem de carga aplicado no caso base sem ações de controle. No entanto, são monitoradas as tensões nos barramentos e quando a menor tensão no sistema atinge 0.850 pu, então é aplicada a ação de controle, seja de aplicação de corte de carga ou aplicação de compensação reativa na barra candidata. A Figura 3.2 mostra o comportamento das tensões nas barras do sistema conforme a carga é incrementada por meio do Método da Continuação.

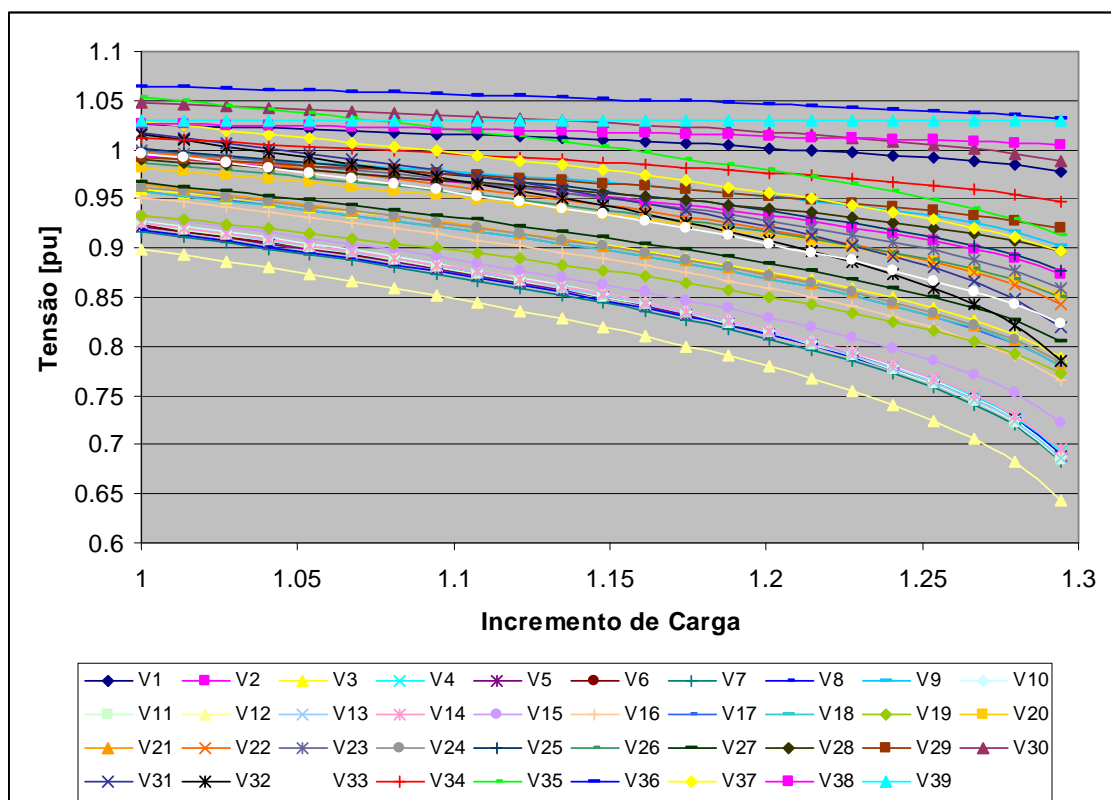


Figura 3.2: Tensão nas Barras Durante o Método da Continuação – Modelo Completo do Sistema

Neste trabalho é aplicada apenas uma ação de controle na barra candidata e o caso não é reajustado. Apesar de não condizer totalmente com as ações que se aplicaria em uma situação real, esta premissa procura isolar os efeitos de uma ação de controle aplicada. Por exemplo, ao se reajustar a tensão em uma barra de geração, fatalmente se

readequariam os fluxos de carga no sistema e poderia mudar totalmente o cenário das barras que são mais críticas no sistema em relação ao colapso de tensão.

3.3. APLICAÇÃO NO MODELO COMPLETO DO SISTEMA

Conforme discutido no Capítulo 2, o grau de complexidade e o detalhamento necessário de um modelo para estudo são dependentes da análise a ser executada e dos fenômenos envolvidos. Pode acontecer de simplificações na modelagem do sistema provocar conclusões equivocadas para o pesquisador. Assim, de forma a realizar comparações, além da aplicação de ações de controle baseadas no modelo completo do sistema, também serão realizadas análises considerando o modelo estático do sistema, ou seja, na formulação do fluxo de carga do modelo estático são consideradas as barras PV e *swing*. Nesta seção será considerado o modelo completo do sistema e posteriormente será realizado teste com o modelo estático.

3.3.1. IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO REATIVA E CORTE DE CARGA NO PONTO DE COLAPSO

Para obtenção do vetor tangente à esquerda VT_w é considerado a variação do parâmetro a variação de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema. VT_w e VT_w são calculado através da formulação discutida no Capítulo 2.

Como discutido na Seção 2.3, o colapso de tensão está intimamente relacionado à perda da habilidade de manter o balanço apropriado de potência reativa e manter um suporte adequado de tensão através do sistema, situação esta que ocorre quando o SEP está operando com níveis de carga muito elevados e o transporte de potência reativa em uma determinada região elétrica se torna mais difícil. Desta forma, ações que aliviam o carregamento das linhas de transmissão ou que suprem localmente as demandas de potência reativa são importantes para afastar o sistema do colapso de tensão.

Este trabalho foca nas ações de controle voltadas para a compensação de potência reativa e o corte de carga⁷. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam a classificação dos vetores tangentes para a variação de potencia ativa e potência reativa, respectivamente, em relação à variação do parâmetro $\Delta\lambda$, no ponto de bifurcação. Assim, são classificadas as melhores barras para aplicação de controle através de VT_w e VT .

Tabela 3.1 Identificação de compensação através de VT_w e VT no ponto de bifurcação

	39 barras	
	$\Delta Q/\Delta\lambda$	$\Delta V/\Delta\lambda$
1°	12	12
2°	11	10
3°	10	13
4°	13	7
5°	6	5
6°	7	8
7°	5	14
Última	1	34

Tabela 3.2 Identificação de corte de carga através de VT_w e VT no ponto de bifurcação

	39 barras	
	$\Delta P/\Delta\lambda$	$\Delta\theta/\Delta\lambda$
1°	8	31
2°	39	12
3°	7	23
4°	3	20
5°	4	21
6°	18	8
7°	27	39
Última	31	27

É importante ressaltar que não foram consideradas as barras de passagem, ou seja, as barras que não possuem carga, para ações de corte de carga. Além disso, não são consideradas ações de compensação de potência reativa nas barras com geradores visto

⁷ Os cortes de carga são aplicados com fator de potência constante.

que qualquer modificação de potência reativa nas barras citadas seria absorvida pela máquina síncrona, devido às características inerentes do funcionamento de seu Regulador de Tensão.

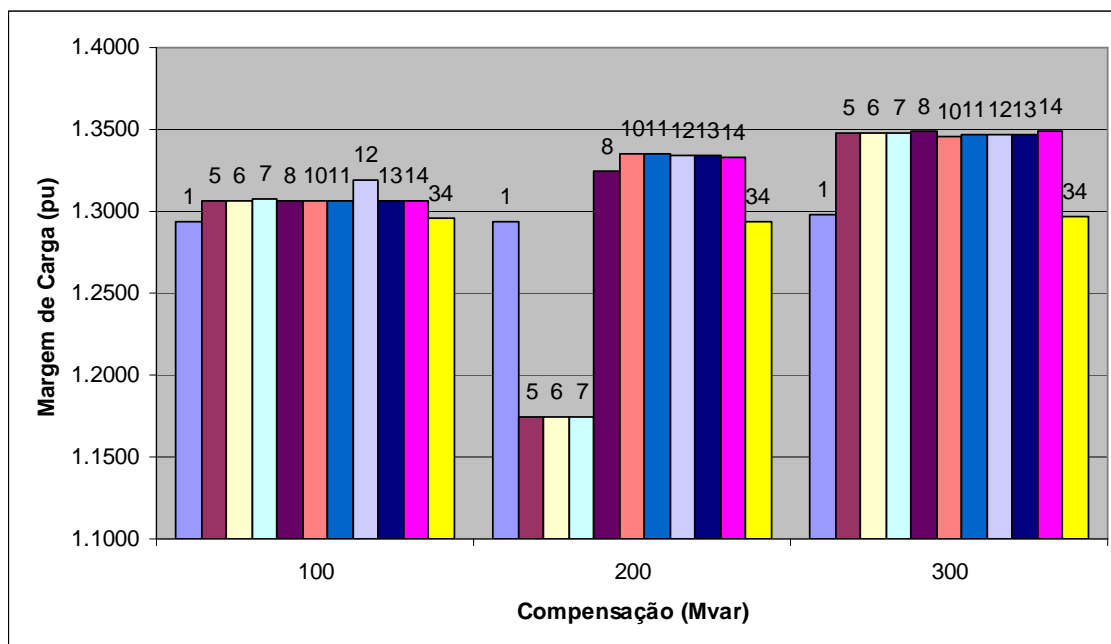
Deve-se ressaltar ainda que a última barra candidata classificada nas tabelas citadas destaca o controle menos significativo para a aplicação da compensação de potência reativa ou corte de carga, de acordo com o caso estudado.

A partir das ações de controle sugeridas pela Tabela 3.1, aplicou-se compensação de 100, 200 e 300 Mvar para cada uma das barras candidatas apontadas pelo vetor tangente, no caso base. A partir daí, a nova margem de carga foi obtida, conforme processo descrito na Seção 3.2. Essas ações são resumidas na Tabela 3.3 e na Figura 3.3.

Nota-se da Tabela 3.2 que o tanto VT_w como VT classifica a mesma barra melhor candidata para a ação de controle para compensação de potência reativa e, assim, as informações de variação de potência reativa e variação de tensão na barra apresentam o mesmo grau de relevância. Observa-se também que a barras com pior classificação apresenta menor efeito para aumento da margem de carga por ambas as classificações. Para a compensação de 100 Mvar as barras 5, 6 e 7 apresentam um pior resultado em relação à margem de carga. Atribui-se este comportamento à não linearidade do sistema. Contudo estas barras apresentam melhores resultados para as demais compensações. Deve-se considerar que este resultado não influi no objetivo da ferramenta, que é apresentar a barra melhor candidata à ação de controle, neste caso para compensação reativa. Agora, considerando as ações de controle sugeridas pela Tabela 3.2, aplicou-se corte de carga de 25, 50 e 75% para cada uma delas. A partir daí, a nova margem de carga foi obtida. A Tabela 3.4 e a Figura 3.4 resumem esta aplicação.

Tabela 3.3 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

Mvar	100	200	300
Barra 1	1.2940	1.2940	1.2977
Barra 5	1.3067	1.1745	1.3476
Barra 6	1.3067	1.1745	1.3474
Barra 7	1.3070	1.1745	1.3479
Barra 8	1.3069	1.3247	1.3489
Barra 10	1.3064	1.3350	1.3462
Barra 11	1.3065	1.3354	1.3464
Barra 12	1.3192	1.3338	1.3465
Barra 13	1.3065	1.3339	1.3464
Barra 14	1.3067	1.3332	1.3485
Barra 34	1.2957	1.2938	1.2966

Figura 3.3 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

Pode observar a partir da Figura 3.4 que VT_w sugere as barras para corte de carga que produzem os melhores resultados para aumentos na margem de carga do sistema. Além disso, pode ser observado que a mesma barra que o VT indica como melhor barra para executar ação de controle, o VT_w indica como uma ação pior candidata para melhora da margem de carga do sistema. Assim, o VT_w apresenta a melhor classificação das barras para o controle de corte de carga em relação ao VT , proporcionando a indicação da

alternativa mais eficiente para afastar o sistema do ponto de colapso de tensão, ou seja, a variação de potência ativa é uma informação mais relevante que a variação de ângulo em uma barra, visto que VT_w tende a produzir resultados melhores do que de VT .

Tabela 3.4 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

% Corte	25	50	75
Barra 3	1.3551	1.3508	1.3486
Barra 4	1.4436	1.4319	1.4503
Barra 7	1.3721	1.3579	1.3565
Barra 8	1.4483	1.4461	1.4385
Barra 12	1.1745	1.1745	1.1745
Barra 18	1.3284	1.3235	1.3320
Barra 20	1.3254	1.3133	1.3223
Barra 21	1.3420	1.3493	1.3324
Barra 23	1.3248	1.3180	1.3190
Barra 27	1.3487	1.3398	1.3466
Barra 31	1.1745	1.2966	1.2880
Barra 39	1.4405	1.4270	1.4186

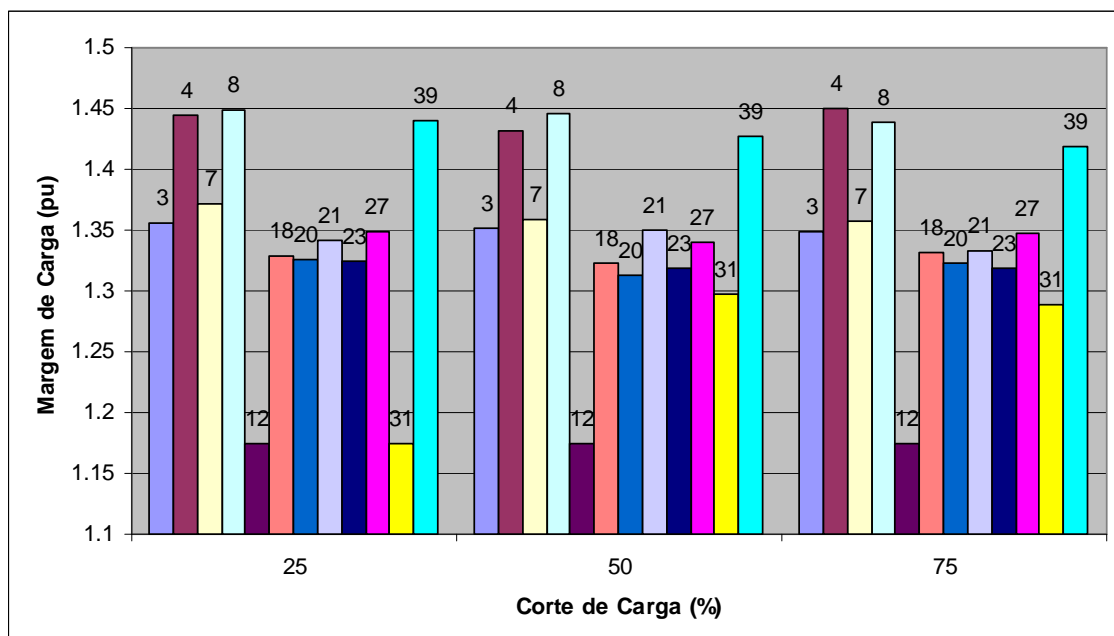


Figura 3.4 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

3.3.2. IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO REATIVA E CORTE DE CARGA NO CASO BASE

Nesta seção é efetuada análise equivalente à seção anterior. Porém, tanto o VT_w quanto VT são calculados no caso base de operação, com intuito de verificar a antecipação das barras críticas do sistema antes do colapso de tensão. Assim, as Tabelas 3.5 e 3.6 apresentam a classificação dos vetores tangentes para a variação de potencia ativa e potência reativa, respectivamente, em relação à variação do parâmetro $\Delta\lambda$, porém, calculado no caso base.

Tabela 3.5 Identificação de compensação através de VT_w e VT no caso base

	39 barras	
	$\Delta Q/\Delta\lambda$	$\Delta V/\Delta\lambda$
1°	12	12
2°	11	10
3°	13	13
4°	4	11
5°	7	6
6°	10	5
7°	5	14
Última	30	1

Tabela 3.6 Identificação de corte de carga através de VT_w e VT no caso base

	39 barras	
	$\Delta P/\Delta\lambda$	$\Delta\theta/\Delta\lambda$
1°	23	23
2°	20	21
3°	21	24
4°	24	16
5°	16	15
6°	15	18
7°	12	4
Última	3	29

Do mesmo modo que a seção anterior, a partir das ações de controle sugeridas pela Tabela 3.5, foi aplicada compensação de 100, 200 e 300 Mvar para cada uma delas e foi obtida a nova margem de carga. As Tabela 3.7 e a Figura 3.5 apresentam o resultado.

Tabela 3.7 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

Mvar	100	200	300
Barra 1	1.2940	1.2940	1.2977
Barra 4	1.3068	1.3229	1.3327
Barra 5	1.3067	1.1745	1.3476
Barra 6	1.3067	1.1745	1.3474
Barra 7	1.3070	1.1745	1.3479
Barra 10	1.3064	1.3350	1.3462
Barra 11	1.3065	1.3354	1.3464
Barra 12	1.3192	1.3338	1.3465
Barra 13	1.3065	1.3339	1.3464
Barra 14	1.3067	1.3332	1.3485
Barra 30	1.2939	1.2936	1.2942

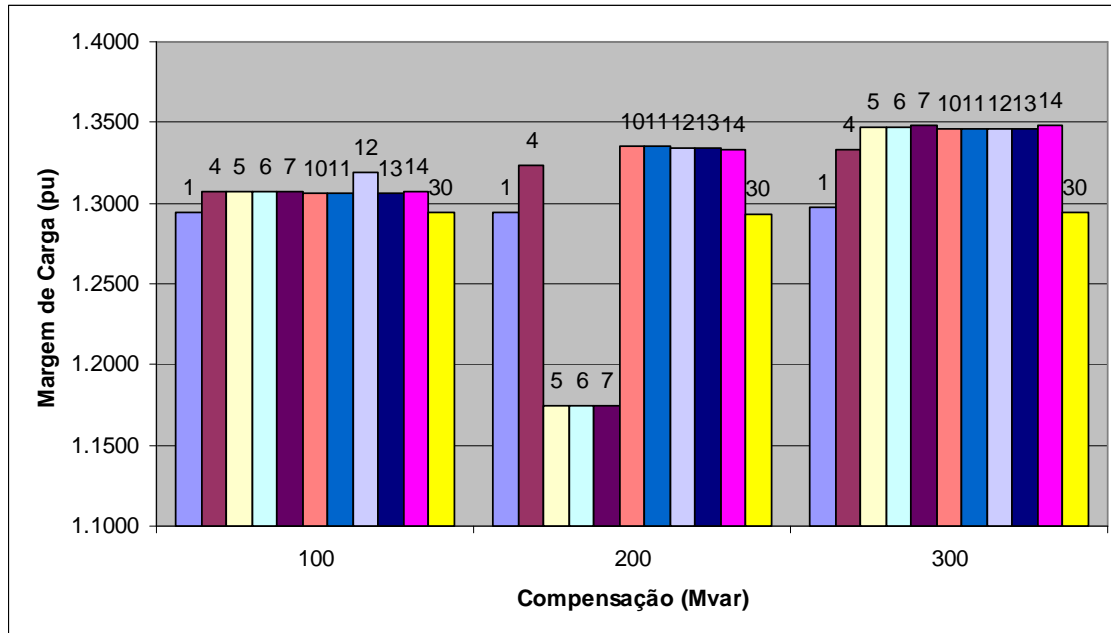


Figura 3.5 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

Nota-se na Tabela 3.5 que tanto VT_w como VT apontam para a mesma barra para compensação de potência reativa. Desta forma, as informações de variação de potência

reativa e variação de tensão na barra apresentam o mesmo grau de relevância. Então, da mesma forma o VT , VT_w também tende a apontar a barra crítica do sistema para a aplicação de controle com compensação de potência reativa já no caso base, sem a necessidade de se levar o sistema ao ponto de colapso de tensão para realizar este cálculo.

Para as ações de controle sugeridas pela Tabela 3.6, aplicou-se corte de carga de 25, 50 e 75% para cada uma delas. A partir daí, a nova margem de carga foi obtida. A Tabela 3.8 e a Figura 3.6 resumem esta aplicação.

Nota-se na Tabela 3.6 que tanto VT_w como VT apontam para a mesma barra para corte de carga, apontando para o mesmo resultado e, desta forma, e as informações de variação de potência reativa e variação de tensão na barra apresentam o mesmo grau de relevância. No entanto, pode ser observado a partir da Figura 3.6 que o VT_w e VT aplicado ao caso base não apontam para as barras mais eficazes para aplicação de controle para corte de carga e ambos não representam uma boa ferramenta quando aplicado ao caso base, não antecipando as barras críticas do sistema antes do ponto de colapso de tensão. Além disso, a melhor barra para a aplicação de controle de corte de carga é apresentada pela classificação pelo VT como uma ação menos relevante.

Tabela 3.8 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

% Corte	25	50	75
Barra3	1.3551	1.3508	1.3486
Barra4	1.4436	1.4319	1.4503
Barra12	1.1745	1.1745	1.1745
Barra15	1.3754	1.3757	1.3781
Barra16	1.3522	1.3546	1.3451
Barra18	1.3284	1.3235	1.3320
Barra20	1.3254	1.3133	1.3223
Barra21	1.3420	1.3493	1.3324
Barra23	1.3248	1.3180	1.3190
Barra24	1.3370	1.3324	1.3205
Barra29	1.3287	1.3249	1.3205

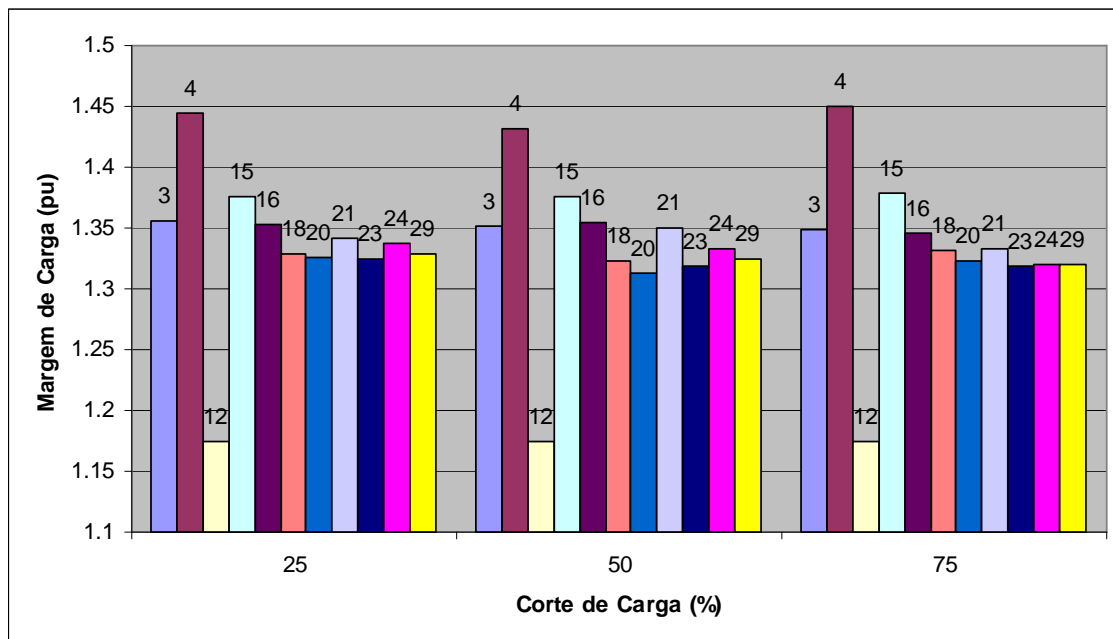


Figura 3.6 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

3.3.3. IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO REATIVA E CORTE DE CARGA NO PRIMEIRO PASSO DO MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

Nesta seção é executado novamente o procedimento da seção anterior, porém, o VT_w e o VT são calculados no primeiro passo do Método da Continuação, e desta forma pode-se observar se há uma tendência de indicação antecipada das barras críticas do sistema antes do colapso de tensão, após um pequeno incremento de carga em relação ao caso base. Assim, as Tabelas 3.9 e 3.10 apresentam a classificação dos vetores tangentes para a variação de potencia ativa e potência reativa, respectivamente, em relação à variação do parâmetro $\Delta\lambda$, porém, calculado no ponto operativo base.

Tabela 3.9 Identificação de compensação através de VTw e VT no caso base

	39 barras	
	$\Delta Q/\Delta\lambda$	$\Delta V/\Delta\lambda$
1°	12	12
2°	13	13
3°	11	11
4°	10	10
5°	14	14
6°	7	7
7°	5	5
Última	1	1

Tabela 3.10 Identificação de corte de carga através de VTw e VT no caso base

	39 barras	
	$\Delta P/\Delta\lambda$	$\Delta\theta/\Delta\lambda$
1°	39	20
2°	8	23
3°	7	39
4°	4	8
5°	3	7
6°	25	21
7°	12	4
Última	23	15

Do mesmo modo que a seção anterior, a partir das ações de controle sugeridas pela Tabela 3.9, foi aplicada compensação de 100, 200 e 300 Mvar para cada uma delas e foi obtida a nova margem de carga. As Tabelas 3.11 e a Figura 3.7 apresentam o resultado.

Tabela 3.11 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

Mvar	100	200	300
Barra 1	1.2940	1.2940	1.2977
Barra 5	1.3067	1.1745	1.3476
Barra 7	1.3070	1.1745	1.3479
Barra 10	1.3064	1.3350	1.3462
Barra 11	1.3065	1.3354	1.3464
Barra 12	1.3192	1.3338	1.3465
Barra 13	1.3065	1.3339	1.3464
Barra 14	1.3067	1.3332	1.3485

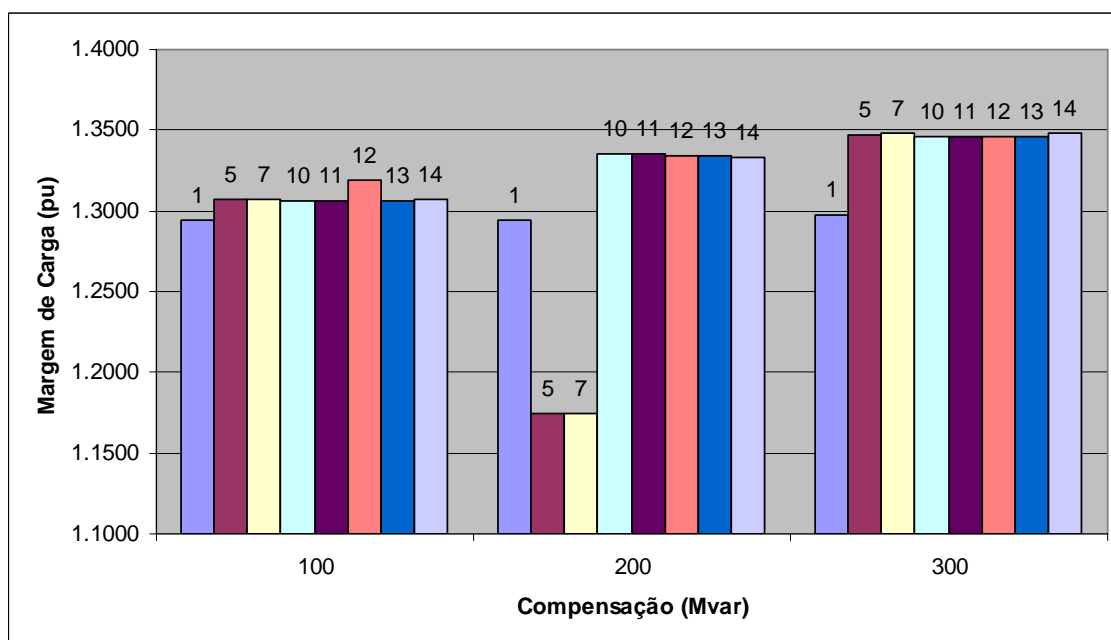


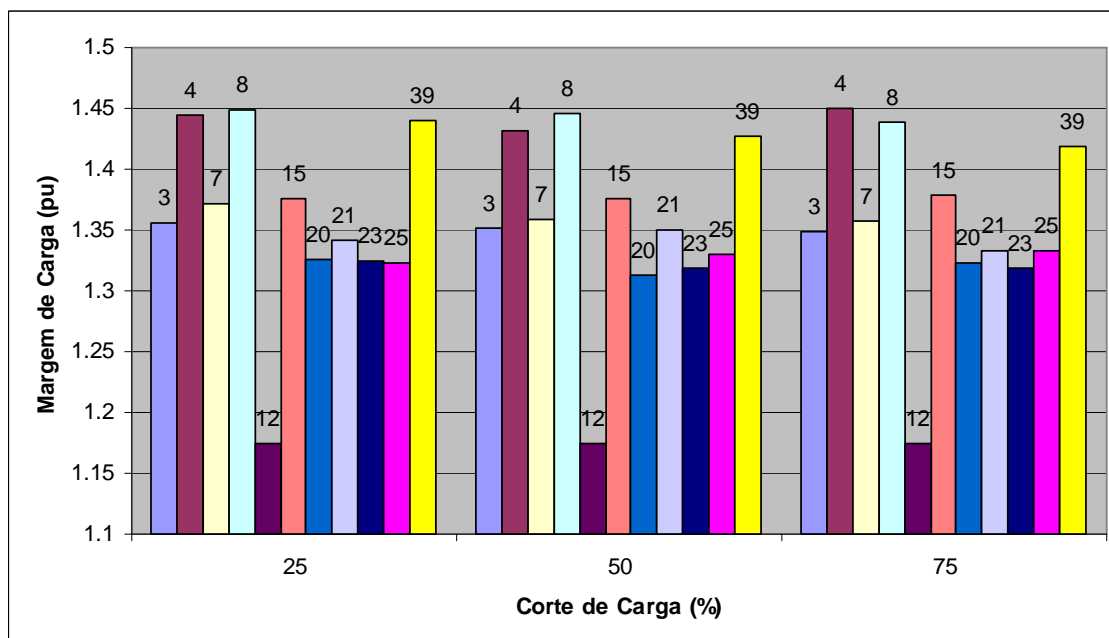
Figura 3.7 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

Nota-se na Tabela 3.9 que tanto VT_w como VT apontam para a mesma barra para compensação de potência reativa indicando um mesmo resultado e, desta forma, e as informações de variação de potência reativa e variação de tensão na barra apresentam o mesmo grau de relevância. Adicionalmente, VT_w e VT passam a estar alinhados, ou seja, indicam a mesma classificação das barras. Então, da mesma forma que VT , VT_w também tende a apontar barra crítica do sistema para a aplicação de controle com compensação de potência reativa também após o primeiro passo do Método da Continuação, da mesma forma que no caso base, sem a necessidade de se levar o sistema ao ponto de colapso de tensão para realizar este cálculo.

Para as ações de controle sugeridas pela Tabela 3.10, aplicou-se corte de carga de 25, 50 e 75% para cada uma delas. A partir daí, a nova margem de carga foi obtida. A Tabela 3.12 e a Figura 3.8 resumem esta aplicação.

Tabela 3.12 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

% Corte	25	50	75
Barra3	1.3551	1.3508	1.3486
Barra4	1.4436	1.4319	1.4503
Barra7	1.3721	1.3579	1.3565
Barra8	1.4483	1.4461	1.4385
Barra12	1.1745	1.1745	1.1745
Barra15	1.3754	1.3757	1.3781
Barra20	1.3254	1.3133	1.3223
Barra21	1.3420	1.3493	1.3324
Barra23	1.3248	1.3180	1.3190
Barra25	1.3227	1.3296	1.3327
Barra39	1.4405	1.4270	1.4186

Figura 3.8 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

Nota-se na Tabela 3.10 que VT_w e VT apontam para barras diferentes para corte de carga após o primeiro passo do Método da Continuação, apontando diferentes resultados. No entanto, verifica-se a variação de potência reativa apresenta um resultado com grau de relevância maior que a variação de tensão. Assim, pode ser observado a partir na Figura 3.8 que o VT_w apresenta a melhor classificação das barras para o controle de corte de carga em relação ao VT , proporcionando a alternativa mais eficiente para afastar o

sistema do ponto de colapso de tensão, ou seja, a variação de potência ativa é uma informação mais relevante que a variação de ângulo em uma barra, visto que VT_w tende a produzir resultados melhores do que de VT .

É importante ressaltar que os resultados para controle através de corte de carga passam a ter resultados significativos a partir do primeiro passo do Método da Continuação e não simplesmente no caso base. Embora já seja de grande valia incrementar apenas um passo do Método da Continuação a ter que levar o sistema ao ponto de colapso de tensão e só assim então obter as barras críticas do sistema, reduzindo necessidade de tempo computacional.

3.4. APLICAÇÃO NO MODELO ESTÁTICO DO SISTEMA

As aplicações são análogas ao capítulo anterior, no entanto, considera-se o modelo estático de fluxo de carga. Lembrando que é assumido que as barras de geração PV são modeladas como capaz de manter a geração de potência ativa especificada e a tensão fixa, gerando a potência reativa suficiente para manter esta tensão.

Além disto, a barra *swing* tem o papel de suprir as perdas do sistema e suprir a variação de solicitação de carga do sistema. Contudo, uma variação de carga em um ponto do sistema deveria fazer com que todos os geradores fossem sensibilizados se readequem às novas solicitações da carga. Assim, com a variação de carga haverá uma readequação dos fluxos nas linhas de transmissão de tal forma que a barra swing compense essa variação de cargas, podendo acontecer de uma linha de transmissão que já estava em dificuldade de suprir reativo agrave a situação do sistema.

Para este caso, a margem de carga do sistema *New England* 39 barras é 2.0225.

Para o modelo estático do sistema é mantido a mesma premissa adotada para obtenção da nova margem de carga. Assim, são monitorados as tensões nos barramento e quando a menor tensão atinge 0.850 pu então é aplicada ação de controle, seja de aplicação de corte de carga ou aplicação de compensação reativa na barra candidata. As variações de tensão conforme é incrementada a carga por meio do Método da Continuação, podem ser observadas na figura 3.9.

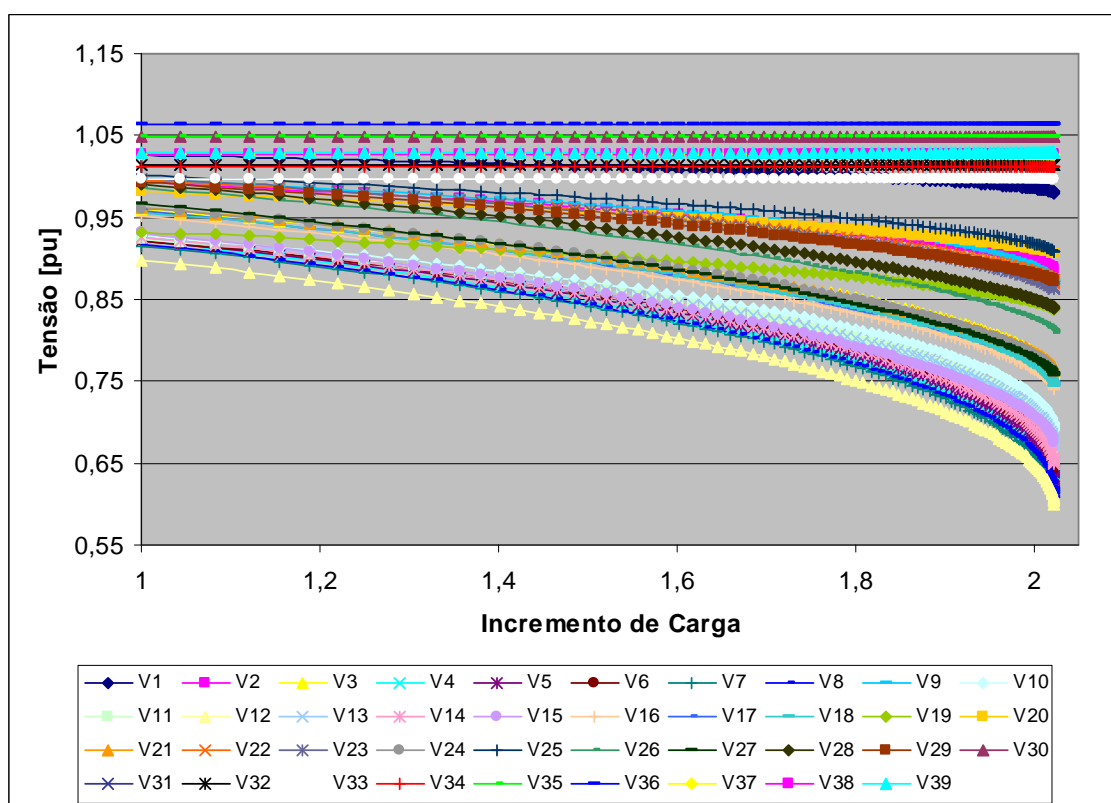


Figura 3.9: Tensão nas Barras Durante o Método da Continuação – Modelo Estático do Sistema

É importante ressaltar que é aplicada apenas uma ação de controle na barra candidata e o caso não é reajustado. O que por sua vez procura isolar os efeitos da ação de controle.

Observe que, por exemplo, a barra 36 apresenta a tensão fixa durante todo o Método da Continuação em direção ao ponto de colapso de tensão por se tratar de uma barra do

tipo PV, fato este que discorda do comportamento real da tensão em uma barra para um caso real.

3.4.1. IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO REATIVA E CORTE DE CARGA NO PONTO DE COLAPSO

Da mesma forma que na seção anterior, para obtenção do vetor tangente à esquerda VT_w é considerado a variação do parâmetro a variação de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema, conforme descrito na Seção 3.2. VT_w e VT_r são calculados através da formulação discutida no Capítulo 2.

As Tabelas 3.13 e 3.14 apresentam a classificação dos vetores tangentes para a variação de potencia ativa e potência reativa, respectivamente, em relação à variação do parâmetro $\Delta\lambda$, no ponto de bifurcação. Assim, são classificadas as melhores barras para aplicação de controle através de VT_w e VT_r .

É importante ressaltar que não foram consideradas as barras de passagem para ações de corte de carga e nem as barras de geração são consideradas para ações de compensação de potência reativa. A última barra classificada nas tabelas citadas destaca o controle menos significativo para a aplicação da compensação de potência reativa ou corte de carga, de acordo com o caso estudado.

Tabela 3.13 Identificação de compensação através de VT_w e VT_r no ponto de bifurcação

	39 barras	
	$\Delta Q/\Delta\lambda$	$\Delta V/\Delta\lambda$
1°	7	7
2°	8	8
3°	12	5
4°	5	6
5°	6	12
6°	4	4
7°	11	11
Última	1	20

Tabela 3.14 Identificação de corte de carga através de VT_w e VT no ponto de bifurcação

	39 barras	
	$\Delta P/\Delta \lambda$	$\Delta \theta/\Delta \lambda$
1°	8	8
2°	7	3
3°	4	18
4°	3	27
5°	18	4
6°	27	7
7°	15	25
Última	12	12

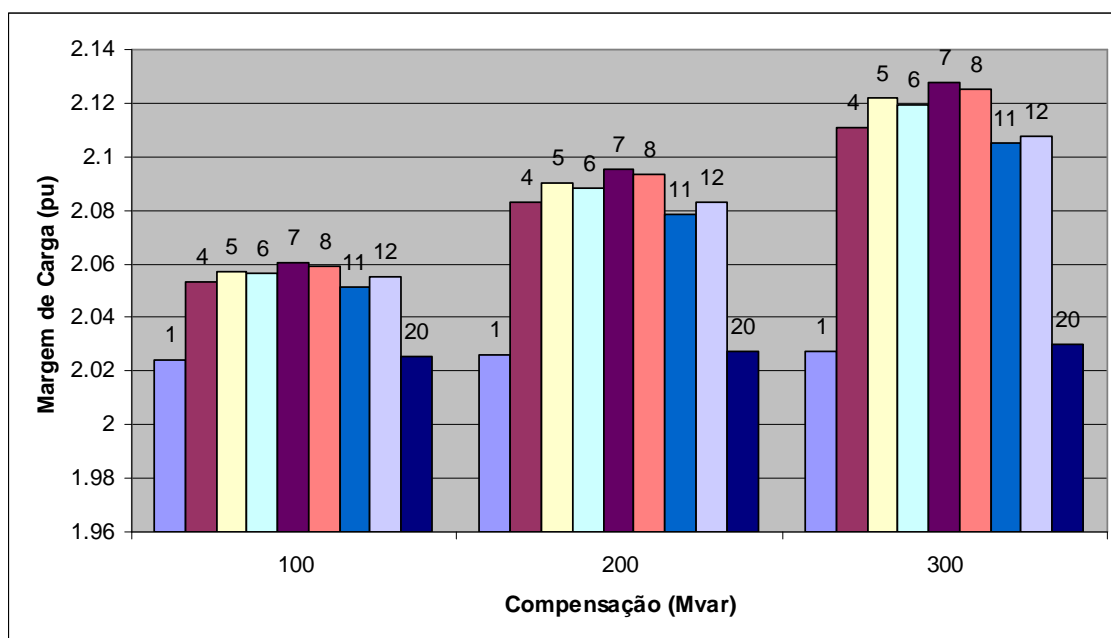
A partir das ações de controle sugeridas pela Tabela 3.13, aplicou-se compensação de 100, 200 e 300 Mvar para cada uma delas. A partir daí, a nova margem de carga foi obtida. Essas ações são resumidas na Tabela 3.15 e na Figura 3.10.

Nota-se da Tabela 3.13 que tanto VT_w como VT sugerem as mesmas barras para compensação de potência reativa que produzem os mesmos aumentos na margem de carga do sistema. Assim, e as informações de variação de potência reativa e variação de tensão na barra apresentam o mesmo grau de relevância e a classificação pelo VT tende a produzir os mesmos resultados do que VT_w . Note que as indicações para as barras menos significativas por ambas as classificações são distintas. No entanto, os efeitos na margem de carga para compensação de potência reativa apresentam resultados semelhantes.

Agora, considerando as ações de controle sugeridas pela Tabela 3.10, aplicou-se corte de carga de 25, 50, 75% para cada uma delas. A partir daí, a nova margem de carga foi obtida. A Tabela 3.16 e a Figura 3.17 resumem esta aplicação.

Tabela 3.15 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

Mvar	100	200	300
Barra 1	2.0243	2.0258	2.0273
Barra 4	2.0534	2.0828	2.1108
Barra 5	2.0572	2.0903	2.1219
Barra 6	2.0562	2.0884	2.1192
Barra 7	2.0604	2.0955	2.1278
Barra 8	2.0593	2.0934	2.1249
Barra 11	2.0513	2.0788	2.1051
Barra 12	2.0550	2.0829	2.1074
Barra 20	2.0251	2.0276	2.0300

**Figura 3.10 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT**

Pode-se observar a partir da Tabela 3.14 que tanto VT_w como VT sugerem a barras para corte de potência ativa que produz melhor aumento na margem de carga do sistema e, desta forma, a variação de potência ativa em uma barra é uma informação tão relevante quanto a variação de ângulo na barra, já que as indicações de VT_w indica a mesma melhor barra como VT . É possível observar através da Figura 3.11 que o barramento 4 também produz aumento significativo para aplicação de controle de corte de carga e

somente é apontado em terceiro lugar pelo VT_w , logo após o barramento 3 que apresenta um resultado menos significativo.

Tabela 3.16 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

% Corte	25	50	75
Barra 3	2.0797	2.1279	2.1654
Barra 4	2.1454	2.2490	2.3236
Barra 7	2.0847	2.1421	2.1928
Barra 8	2.1613	2.2626	2.3202
Barra 12	2.0386	2.0538	2.0680
Barra 15	2.0896	2.1467	2.1921
Barra 18	2.0527	2.0810	2.1068
Barra 25	2.0552	2.0834	2.1067
Barra 27	2.0726	2.1150	2.1483

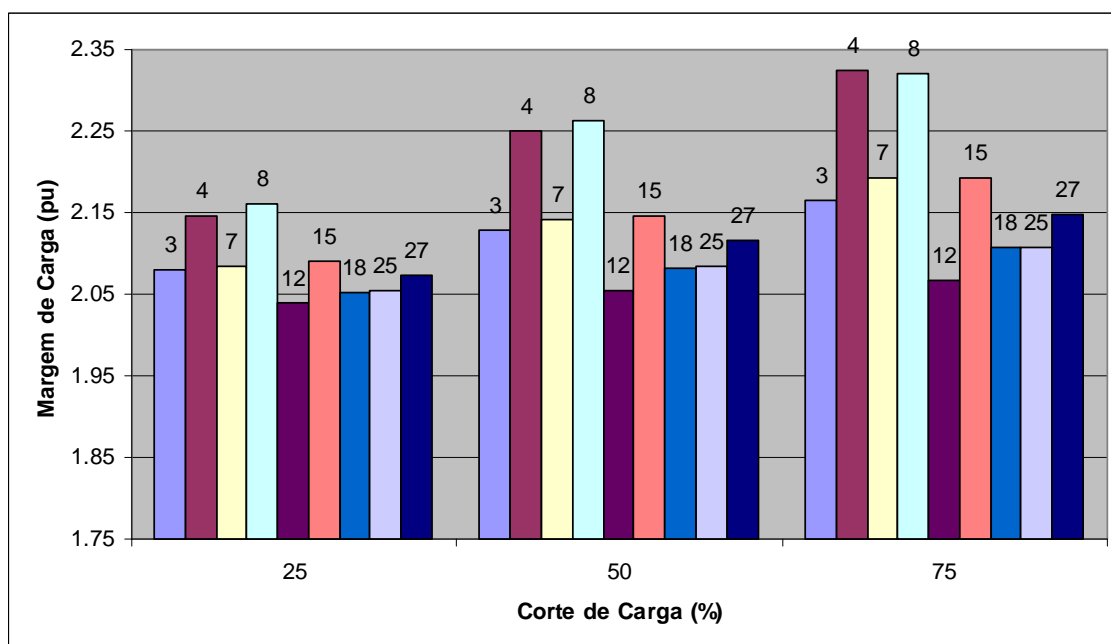


Figura 3.11 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

3.4.2. IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO REATIVA E CORTE DE CARGA NO CASO BASE

Nesta seção é efetuada análise equivalente à do capítulo anterior, no entanto o VT_w como VT são calculados no ponto base de operação, com intuito de verificar a antecipação das barras críticas do sistema antes do colapso de tensão. Assim, as Tabelas 3.18 e 3.19 apresentam a classificação dos vetores tangentes para a variação de potência ativa e potência reativa, respectivamente, em relação à variação do parâmetro $\Delta\lambda$, porém, calculado no ponto operativo base.

Tabela 3.18 Identificação de compensação através de VT_w e VT no caso base

	39 barras	
	$\Delta Q/\Delta\lambda$	$\Delta V/\Delta\lambda$
1°	7	12
2°	6	4
3°	5	8
4°	8	7
5°	12	15
6°	4	14
7°	11	5
Última	1	1

Tabela 3.19 Identificação de corte de carga através de VT_w e VT no caso base

	39 barras	
	$\Delta P/\Delta\lambda$	$\Delta\theta/\Delta\lambda$
1°	27	8
2°	26	7
3°	28	4
4°	18	3
5°	20	18
6°	24	15
7°	16	27
Última	7	23

Do mesmo modo que a seção anterior, a partir das ações de controle sugeridas pela Tabela 3.18, foi aplicada compensação de 100, 200 e 300 Mvar para cada uma delas e foi obtida a nova margem de carga. A Tabela 3.20 e a Figura 3.12 apresentam o resultado.

Tabela 3. 20 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

Mvar	100	200	300
Barra 1	2.0243	2.0258	2.0273
Barra 4	2.0534	2.0828	2.1108
Barra 5	2.0572	2.0903	2.1219
Barra 6	2.0562	2.0884	2.1192
Barra 7	2.0604	2.0955	2.1278
Barra 8	2.0593	2.0934	2.1249
Barra 11	2.0513	2.0788	2.1051
Barra 12	2.0550	2.0829	2.1074
Barra 14	2.0509	2.0779	2.1038
Barra 15	2.0420	2.0603	2.0776

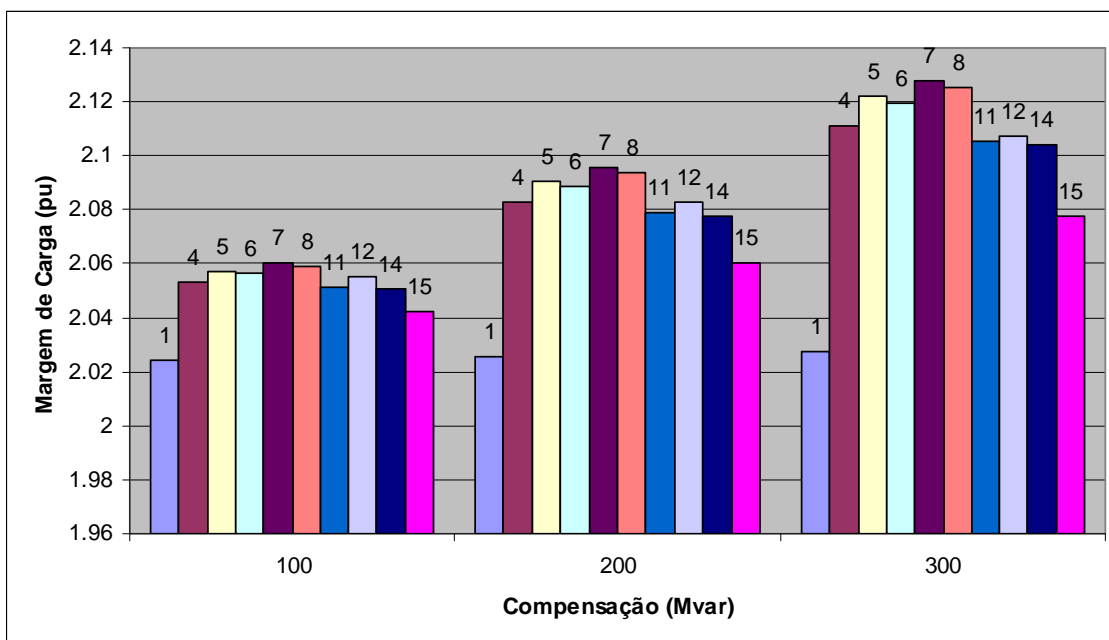


Figura 3.12 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

Nota-se da Figura 3.12 que tanto VT_w como VT tendem a sugerir barras para compensação de potência reativa que produzem aumentos similares na margem de carga do sistema. No entanto, é possível perceber que a variação na potência reativa em uma barra é uma informação mais relevante do que a variação de tensão, uma vez que as indicações de VT_w tendem a produzir resultados ligeiramente melhores do que VT .

Para as ações de controle sugeridas pela Tabela 3.19, aplicou-se corte de carga de 25, 50 e 75% para cada uma delas. A partir daí, a nova margem de carga foi obtida. A Tabela 3.21 e a Figura 3.13 resumem esta aplicação.

Pode ser observado a partir da Figura 3.13 que o VT_w , calculado no caso base, indica barras candidatas que não produzem os melhores resultados para controle de corte de carga. Assim, nota-se que a variação de ângulo em uma barra é uma informação mais relevante do que a variação de potência ativa, visto que VT tendem a produzir resultados melhores do que de VT_w .

Tabela 3.21 Margem de carga do sistema de 39 barras considerando as ações de controle

% Corte	25	50	75
Barra 3	2.0797	2.1279	2.1654
Barra 4	2.1454	2.2490	2.3236
Barra 7	2.0847	2.1421	2.1928
Barra 8	2.1613	2.2626	2.3202
Barra 15	2.0896	2.1467	2.1921
Barra 16	2.0711	2.1074	2.1295
Barra 18	2.0527	2.0810	2.1068
Barra 20	2.0689	2.0107	1.8639
Barra 23	2.0470	2.0600	2.0577
Barra 24	2.0585	2.0805	2.0862
Barra 26	2.0442	2.0641	2.0819
Barra 27	2.0726	2.1150	2.1483
Barra 28	2.0486	2.0685	2.0809

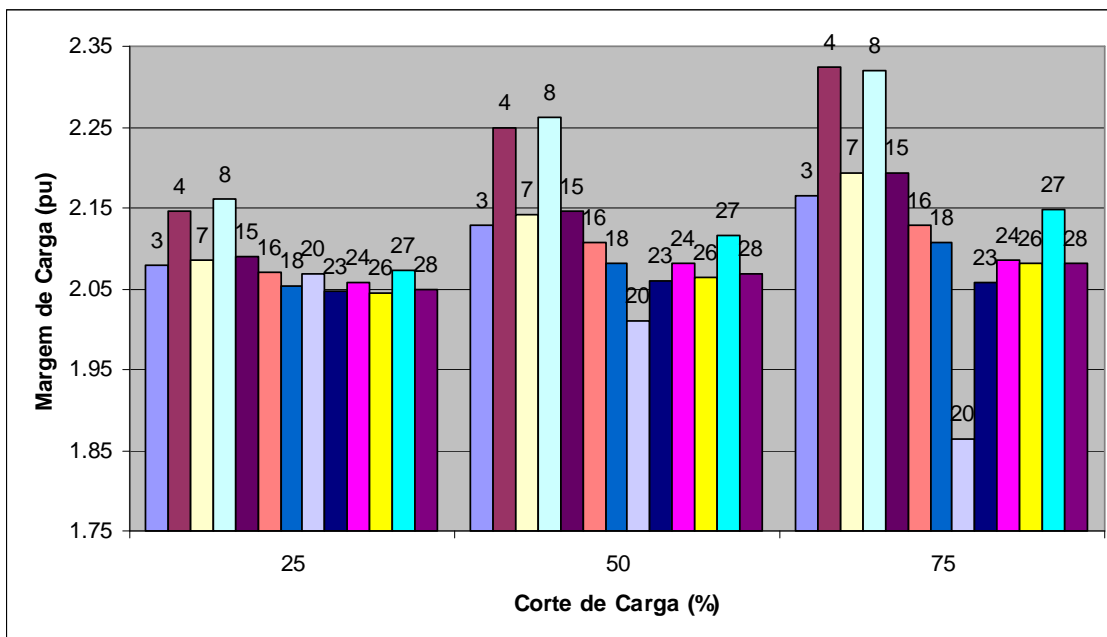


Figura 3.13 – Margem de carga para compensações sugeridas por VT_w e VT

3.4.3. IDENTIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO REATIVA E CORTE DE CARGA NO PRIMEIRO PASSO DO MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

Diferentemente do caso referente ao modelo completo do sistema, para o modelo estático não há mudança significativa em relação à classificação no caso base, produzindo os mesmos resultados.

CAPÍTULO 4

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. CONCLUSÃO

Com a exploração cada vez mais intensa dos sistemas elétricos de potência, faz-se tomar foco o problema de instabilidade de tensão, problema este que é inerente a um nível de carregamento bastante elevado. Os aumentos contínuos nas cargas podem, eventualmente, dirigir o sistema a um estado instável caracterizado pela diminuição rápida dos valores da tensão nos barramentos. Este problema é denominado instabilidade de tensão. A instabilidade de tensão pode levar parte do sistema a níveis de tensão muito baixos, podendo se propagar para as demais regiões elétricas do sistema, com possibilidade de finalizar em um colapso. Neste contexto, quando um sistema elétrico de potência caminha para a região de instabilidade de tensão, deve-se aplicar ações corretivas para evitar que o processo de instabilidade ocorra.

Considerando que o sistema caminha lentamente de um ponto de equilíbrio a outro, conforme a carga é lentamente alterada, a análise estática é suficiente para estudar o comportamento do sistema. Com isso, as equações que modelam o sistema podem ser representadas por um conjunto de equações algébricas, como no caso do fluxo de potência (ou fluxo de carga). No entanto, o modelamento considerando a formulação da máquina síncrona e de seus respectivos controles torna a análise mais próxima do real. Quando há uma variação de carga no sistema, as perdas não serão mais supridas apenas pela máquina *swing* e agora sim por todas as máquinas do sistema através da iteração de seus reguladores de velocidade. Quando, por exemplo, há um corte de carga a barra

swing era responsável por suprir esta variação de carga, gerando rearranjo dos fluxos de carga nas linhas de transmissão possivelmente em regiões que não a realmente afetada. Como no estudo de colapso de tensão o carregamento da linha de transmissão é um aspecto importante e influencia crucialmente no suprimento de potência reativa em determinado área, a modelagem considerando a realocação real dessa variação de carga no sistema, entre todas as máquinas síncronas, é muito importante, conduzindo a resultados mais reais.

Através do fluxo de carga de um sistema de energia elétrica é possível se determinar o estado de regime permanente do sistema obtendo todas as suas variáveis de estado. De posse das variáveis de estado pode-se determinar qualquer outra variável de interesse

Pode-se analisar a estabilidade do sistema através do *Jacobiano* das equações que modelam o sistema através da técnica de análise por autovalores e seus autovetores associados. O autovetor à direita apresenta a influência de cada variável em um modo de oscilação e o autovetor à esquerda identifica a combinação de variáveis que mais influenciam em um modo de oscilação. Desta forma, pode-se analisar para um determinado ponto de equilíbrio quais variáveis de estado são mais sensíveis à perturbação no sistema e quais variáveis de estado mais quem mais contribuem para esta perturbação.

Conforme o sistema é carregado, suas condições de estabilidade vão se deteriorando. Caso a matriz *Jacobiana* apresente um autovalor real nulo, é dito que o sistema se encontra em um ponto de bifurcação sela-nó. A partir deste ponto, qualquer incremento de carga causará a instabilidade do sistema.

Desta forma, a obtenção deste ponto sela-nó é crucial para análise de estabilidade do sistema. O ponto de operação sela-nó pode ser calculado através do Método da Continuação, onde é utilizado o Vetor Tangente para obtenção dos incrementos

possíveis de carga no caminho para a bifurcação. Uma característica importante do Vetor Tangente é que ele também pode ser utilizado para estudo de estabilidade de um ponto operativo do sistema, uma vez que ele mostra o comportamento das variáveis do sistema em relação a um determinado parâmetro. Além disso, no ponto de bifurcação sela-nó, o vetor tangente é colinear ao autovetor à direita associado ao autovalor real nulo. Esta característica é importante de forma que o vetor tangente pode ser utilizado para se identificar as barras críticas do sistema no ponto de sela-nó.

Desta forma, foi proposta uma aproximação do autovetor à esquerda associada ao autovalor nulo no ponto de bifurcação a partir do vetor tangente, utilizando-se da teoria de autovalores. Esta aproximação é utilizada de forma a identificar ações de controle que melhorem a estabilidade do sistema.

Foram realizadas aplicações numéricas para verificação da metodologia proposta de aproximação do vetor tangente à esquerda para seleção de ações de controle visando a melhora da estabilidade do sistema. Desta foram identificadas ações de controle através do vetor tangente à esquerda, e seus resultados foram comparados às ações de controle sugeridas pelo vetor tangente à direita.

Os resultados mostraram que o método para identificação de controles através do vetor tangente à esquerda tem potencial para aplicação prática, uma vez que conduzem às melhores ações, tanto para ações de controle com compensação de potência reativa quanto para controle através de corte de carga para afastar o sistema da instabilidade, aumentando sua margem de carga.

Para o modelo completo do sistema, no que tange ao controle através da compensação de potência reativa observa-se que o vetor tangente à direita apresenta resultado similar ao vetor tangente à esquerda, inclusive podendo ser aplicado para adiantamento da barra

crítica no caso base, sem a necessidade de realizar o cálculo aplicando o Método da Continuação até o colapso.

No entanto, para o controle com corte de carga observa-se que as informações em relação à variação de potência ativa no ponto de colapso de tensão são mais relevantes, e o VT_w apresenta os resultados mais eficazes. Quando as informações dos vetores tangentes são calculados no caso base, as barras sugeridas não apresentam resultados tão eficazes quanto no ponto de colapso de tensão. No entanto, aplicando o primeiro passo do método da continuação, o VT_w tende a sugerir barras para corte de potência ativa que produzem os melhores resultados para aumento da margem de carga, adiantando o cálculo das ações de controle.

Quando da aplicação do modelo estático do sistema observa-se que as margens de carga são superiores às do modelo completo. No entanto é um resultado que merece atenção já que a aplicação de controle de corte de carga e de inserção de potência ativa exige que sejam reajustados os despachos de potência no sistema, e esse reajuste se dá praticamente pela barra swing, e não pela contribuição dos demais geradores que são determinados como geração fixa, no caso da potência ativa. Isto pode acarretar dificuldade de entrega de potência reativa (devido ao carregamento das linhas de transmissão) em localidades diferentes das que seriam reais através da contribuição de todos os geradores. Além disto, na modelagem estática, tanto o vetor tangente à direita quanto o vetor tangente à esquerda calculados no ponto de colapso de tensão tendem a sugerir barras equivalentes para compensação de potência reativa e para corte de carga, produzindo aumentos similares na margem de carga do sistema. Quando os vetores tangentes são calculados para o caso base, tanto o vetor tangente à direita quanto o vetor tangente à esquerda apontam para barras candidatas que produzem resultados equivalentes quanto à ação de controle de compensação de potência reativa. Já para ação de corte de carga, o vetor tangente à direita indica um melhor resultado.

Classificação esta que não se modifica nos primeiros passos do método da continuação, como ocorreu na aplicação com o modelo completo do sistema. Este é um resultado que merece certo cuidado, já que contempla as limitações do modelo estático do sistema.

Contudo, deve-se levar em consideração as dificuldades para modelamento dos controles e a disponibilidade de seus respectivos dados representação do modelo completo do sistema, ressaltando a importância do estudo do modelo estático do sistema e suas premissas a fim de apontar resultados mais próximos do que ocorre em situações reais.

4.2. TRABALHOS FUTUROS

Extensão do presente trabalho aplicando o estudo em um sistema real de grande porte, incorporando recursos de controle reais tais como LTC, shunts, compensadores síncronos, compensadores estáticos e suas iterações.

CAPÍTULO 5

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] Kundur, P., Morison, G. K., “A Review of Definitions and Classification of Stability Problems in Today’s Power Systems”, IEEE PES Meeting, New York, Feb., 1997.
- [2] Ajarapu, V. Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control. Springer Verlag, 2006.
- [3] Kundur, P., Power System Stability and Control. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [4] Souza A. C. Z.: PhD thesis, “New Techniques to Efficiently Determine Proximity to Static Voltage Collapse”, August 1995.
- [5] Leme, Rafael Coradi ;. Uma Proposta para o Controle da Defasagem Angular entre Duas Barras para o Fechamento em Anel do Sistema de Potência. 2008. Tese (Doutorado em Doutorado Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- [6] Canizares C.A. and Alvarado, F.L.. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems. Power Systems, IEEE Transactions on, 8(1):1–8, Feb 1993.
- [7] Paserba, P. J.; Ajarapu, V.; Andersson, G.; Bose, A.; Canizares, C.; N. Hatziargyriou, Hill, D.; Stankovic, A.; Taylor, C.; Van Cutsem, T.; and Vittal, V.. Definition and Classification of Power System Stability IEEE/Cigre Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Power Systems, IEEE Transactions on, 19(3):1387–1401, Aug. 2004.
- [8] Flatabo, N.; Ognedal, R.; and Carlsen, T.;”Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods,” IEEE Transactions on Power Systems, v. 5, Nov 1990, pp. 1286-1293.
- [9] Begovic, M.; a Phadke,”Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis,” IEEE Transactions on Power Systems, v. 9, May 1994, pp. 946-956.
- [10] Irisarri, G. D.; Wang, X.; Jong, T.; and Mokhtari, S.; ,”Maximum Loadability of Power Systems Using Interior Point Non-linear Optimization Method,” IEEE Transactions on Power Systems, v. 12, no. 1, Feb 1997, pp. 162-172.
- [11] R. Seydel. From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis. Elsevier Science, 1988.
- [12] Ajarapu, V.: Identification of Steady State Voltage Stability in Power Systems, Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry, Mar. 1988, pp. 244-247.
- [13] Souza A. C. Z.; Honório, Leonardo de Mello ; Torres, Geraldo Leite ; Torres, Germano Lambert. Increasing the Loadability of Power Systems Through Optimal-Local-Control Actions. IEEE Transactions on Power Systems, Estados Unidos, v. 19, n. 1, p. 188-194, 2004.
- [14] Ferreira, L. C. A. ; Souza A. C. Z.; Granville, Sérgio ; LIMA, J. W. M. . Interior Point Method Applied to Voltage Collapse Problems and system Losses Reduction. IEE Proc.-Gen. Transm. Distrib, Grã-Bretanha, v. 149, p. 165-170, 2002.
- [15] Souza A. C. Z.; Discussion on Some Voltage Collapse Indices. Electric Power Systems Research, Irlanda, v. 53, n. 1, p. 53-58, 2000.
- [16] P. A. Löff, T. Smed, G. Anderson and D. J. Hill, “Fast Calculation of a Voltage Stability Index,”IEEE Trans. Power Systems, v. 7, no. 1, Feb 1992, pp. 54-64.
- [17] Prada, R. B.; Souza A. C. Z.; V. Filho, X.; Massaud, A. G. ;and Oliveira, J. C.;”Voltage stability: Phenomena Characterization Based on Reactive Control Effects and System Critical Areas Identification,”Proceedings of the third Sepope Meeting , Belo Horizonte , 1991, SP-14.
- [18] Gao, B.; Morrison, G. K.; and Kundur,P.; “Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis,” IEEE/PES Winter Meeting - Paper 90 WM 096-8 PWRS, 1990.
- [19] Mansour, Y.;”Industry Practice in Voltage Stability Analysis of Power Systems,”Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III-Voltage Stability and Security, ECC Inc. , Switzerland, Aug 1994.
- [20] Overbye, T. J. ; de Marco, C. L.;”Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities,”IEEE Trans. Power Systems, v. 6, no. 3, Aug 1991, pp. 1196-1202.

- [21] Klump, R. P.; Overbye, T.; "Assessment of transmission system loadability," IEEE Transactions on Power Systems, v. 12, no. 1, Feb 1997, pp. 416-423
- [22] Souza, A. C. Z.; Leme, Rafael Coradi ; Vasconcelos, L. F. B. ; Lopes, B. I. L. . Energy Function and Unstable Solution by the Means of an Augmented Jacobian. Applied Mathematics and Computation, v. 206, p. 154-163, 2008.
- [23] Schuluter, R. A.; Chang, I. Hu and M. W.; "Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse,"IEEE/PES Winter Meeting - Paper 90 WM 096-8 PWRS, 1990
- [24] Souza, A. C. Z.; Brito, N. H. M. N., "Ações de Controle para Prevenção de Colapso de Tensão: Efeitos e Restrições". Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática. São Paulo, 1996.
- [25] Souza, A. C. Z.; LOPES, Benedito Isaias Lima . "Quasi Dynamic Model and Strategy for Control Actions". Electric Power Components and Systems, Estados Unidos, v. 33, n. 9, p. 1057-1070, 2005.
- [26] Souza, A. C. Z.; LOPES, Benedito Isaias Lima . On Multiple Tap-Blocking to Avoid Voltage Collapse. Electric Power Systems Research, Irlanda, v. 67, n. 3, p. 225-231, 2003.
- [27] Leme, Rafael Coradi ; Ferreira, Luiz Claudio de Araujo ; Lopes, Benedito Isaias Lima ; Souza, A. C. Z.,. Using Redispatch Generators to Reduce the Standing Phase Angle During the System Restoration. IEE Proceedings. Generation, Transmission & Distribution, Inglaterra, v. 153, n. 5, p. 531-539, 2006.
- [28] Chiang, H. D.; Wang, C. S.; Flueck, A. J.; "Look-Ahead Voltage and Load Margin Contingency Selection Functions for Large-Scale Power Systems," IEEE Transactions on Power Systems, v. 12, no. 1, Feb 1997, pp. 173-180.
- [29] Ogata, K, 1967. "State Space Analysis of Control Systems" Chiang,. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, Inc.
- [30] Lopes, Benedito Isaias Lima. "Estabilidade de Sistemas Elétricos no Horizonte de Curto e Longo Prazos." 2004. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá
- [31] Verhulst, F. "Nonlinear Differential Equations and Dynamical Systems". SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [32] Monticelli, Alcir José, "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.
- [33] Sauer, P. W. ; Pai, M. M.. "Power System Dynamics and Stability." Prentice Hall, 1998
- [34] Kundur, P., "General Introduction and Basic Concepts of Voltage Stability Analysis", In: IEEE PES Summer Meeting, IEEE Special Tutorial Course: Voltage Stability, San Diego, 1998.
- [35] Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. Prentice Hall, 4th edition, 2002.
- [36] Stephenson, G., 1975. "Introdução a Matrizes, Conjuntos e Grupos". São Paulo: Edgard Blücher.
- [37] Wilkinson, G. T.. "The Algebraic Eigenvalue Problem." Clarendon Press, Oxford, UK, 1965.
- [38] Alvarado, F.; Anderson, G.; Concordia, H. Clark.; C.; Gao, B.; Mansour, Y.; Kundur, P.; P. Lof.; Taylor, C.; Xu; W.. Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis. Technical Report 93TH0 620-5, IEEE Power Engineering Society, 1993.
- [39] Chiang, Hsiao-Dong; Flueck, A.J.; Shah, K.S.; Balu, N.. Cpflo: a Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior due to Load and Generation Variations. Power Systems, IEEE Transactions on, 10(2):623-634, May 1995.
- [40] Canizares, A. "Voltage Collapse and Transient Energy Function Analyses of AC/DC Systems", PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1991.
- [41] Hadley, Scott W.; Mark, Brian L.; Vannelli, Anthony. "An Efficient Eigenvector Approach for Finding Netlist Partition", IEEE Transaction on CAD/ICAS, v.11, no. 7, July 1992, pp. 885-892.
- [42] Van Cutsem, T., Vournas, C. D., "Voltage Stability Analysis In Transient And Mid-Term Time Scales", IEEE Transactions On Power Systems, V. 11, N.1, Pp. 146-154, February 1992.
- [43] Persson, J.; Soder, Lennart. Comparison of Three Linearization Methods. 16th Power Systems Computation Conference (PSCC2008), Glasgow, UK, 2008.
- [44] Sakaguchi, T.; Matsumoto, K.. "Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102(2):320-329, Feb. 1983.
- [45] Hill, D.J.. "Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies." Power Systems, IEEE Transactions on, 8(1):166-176, Feb 1993.
- [46] Hale, J.; Kocak, H. "Dynamics and Bifurcations." Springer Verlag, 1992.
- [47] Schuluter, R. A.; Hu, I.; Chang, M. W.. "Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse,"IEEE/PES Winter Meeting - Paper 90 WM 096-8 PWRS, 1990.

APÊNDICE A

1. Sistema New England 39 barras

1.1. Dados de Barra:

Barra	Nome da Barra	Tipo	Tensao pu	Carga		Shunt Mvar	Geração MW
				MW	Mvar		
01	BUS1	PQ	1.025	0.0	0.0	0.0	0.0
02	BUS2	PQ	0.991	0.0	0.0	0.0	0.0
03	BUS3	PQ	0.955	322.0	2.4	0.0	0.0
04	BUS4	PQ	0.911	500.0	184.0	0.0	0.0
05	BUS5	PQ	0.911	0.0	0.0	0.0	0.0
06	BUS6	PQ	0.909	0.0	0.0	0.0	0.0
07	BUS7	PQ	0.904	233.8	84.0	0.0	0.0
08	BUS8	PQ	0.906	522.0	176.0	0.0	0.0
09	BUS9	PQ	0.991	0.0	0.0	0.0	0.0
10	BUS10	PQ	0.910	0.0	0.0	0.0	0.0
11	BUS11	PQ	0.909	0.0	0.0	0.0	0.0
12	BUS12	PQ	0.882	8.5	88.0	0.0	0.0
13	BUS13	PQ	0.910	0.0	0.0	0.0	0.0
14	BUS14	PQ	0.914	0.0	0.0	0.0	0.0
15	BUS15	PQ	0.925	320.0	153.0	0.0	0.0
16	BUS16	PQ	0.947	329.4	32.3	0.0	0.0
17	BUS17	PQ	0.953	0.0	0.0	0.0	0.0
18	BUS18	PQ	0.952	158.0	30.0	0.0	0.0
19	BUS19	PQ	0.932	0.0	0.0	0.0	0.0
20	BUS20	PQ	0.981	680.0	103.0	0.0	0.0
21	BUS21	PQ	0.960	274.0	115.0	0.0	0.0
22	BUS22	PQ	0.994	0.0	0.0	0.0	0.0
23	BUS23	PQ	0.996	247.5	84.6	0.0	0.0
24	BUS24	PQ	0.958	308.6	-92.2	0.0	0.0
25	BUS25	PQ	1.000	224.0	47.2	0.0	0.0
26	BUS26	PQ	0.984	139.0	17.0	0.0	0.0
27	BUS27	PQ	0.963	281.0	75.5	0.0	0.0
28	BUS28	PQ	0.988	206.0	27.6	0.0	0.0
29	BUS29	PQ	0.992	283.5	126.9	0.0	0.0
30	BUS30	PV	1.048	0.0	0.0	0.0	250.0
31	BUS31	SWING	0.982	9.2	4.6	0.0	582.3
32	BUS32	PV	0.983	0.0	0.0	0.0	650.0
33	BUS33	PV	0.997	0.0	0.0	0.0	632.0
34	BUS34	PV	1.012	0.0	0.0	0.0	508.0
35	BUS35	PV	1.049	0.0	0.0	0.0	650.0
36	BUS36	PV	1.064	0.0	0.0	0.0	560.0
37	BUS37	PV	1.028	0.0	0.0	0.0	540.0
38	BUS38	PV	1.027	0.0	0.0	0.0	830.0
39	BUS39	PV	1.030	1104.0	250.0	0.0	1000.0

1.2. Dados de Ramos:

Circuito		Resistência	Reatância	Susceptância	Tape
De	Para	%	%	Mvar	
01	02	0.35	4.11	69.87	1.000
01	39	0.20	5.00	37.50	1.000
01	39	0.20	5.00	37.50	1.000
02	03	0.13	1.51	25.72	1.000
02	25	0.70	0.86	14.60	1.000
03	04	0.13	2.13	22.14	1.000
03	18	0.11	1.33	21.38	1.000
04	05	0.08	1.28	13.42	1.000
04	14	0.08	1.29	13.82	1.000
05	06	0.02	0.26	4.34	1.000
05	08	0.08	1.12	14.76	1.000
06	07	0.06	0.92	11.30	1.000
06	11	0.07	0.82	13.89	1.000
07	08	0.04	0.46	7.80	1.000
08	09	0.23	3.63	38.04	1.000
09	39	0.10	2.50	120.00	1.000
10	11	0.04	0.43	7.29	1.000
10	13	0.04	0.43	7.29	1.000
13	14	0.09	1.01	17.23	1.000
14	15	0.18	2.17	36.60	1.000
15	16	0.09	0.94	17.10	1.000
16	17	0.07	0.89	13.42	1.000
16	19	0.16	1.95	30.40	1.000
16	21	0.08	1.35	25.48	1.000
16	24	0.03	0.59	6.80	1.000
17	18	0.07	0.82	13.19	1.000
17	27	0.13	1.73	32.16	1.000
21	22	0.08	1.40	25.65	1.000
22	23	0.06	0.96	18.46	1.000
23	24	0.22	3.50	36.10	1.000
25	26	0.32	3.23	51.30	1.000
26	27	0.14	1.47	23.96	1.000
26	28	0.43	4.74	78.02	1.000
26	29	0.57	6.25	102.90	1.000
28	29	0.14	1.51	24.90	1.000
02	30	0.00	1.81	0.00	1.025
06	31	0.00	5.00	0.00	1.070

Circuito		Resistência	Reatância	Susceptância	Tape
De	Para	%	%	Mvar	
06	31	0.00	5.00	0.00	1.070
10	32	0.00	2.00	0.00	1.070
12	11	0.16	4.35	0.00	1.006
12	13	0.16	4.35	0.00	1.006
19	20	0.07	1.38	0.00	1.060
19	33	0.07	1.42	0.00	1.070
20	34	0.09	1.80	0.00	1.009
22	35	0.00	1.43	0.00	1.025
23	36	0.05	2.72	0.00	1.000
25	37	0.06	2.32	0.00	1.025
29	38	0.08	1.56	0.00	1.025

1.3. Diagrama Unifilar:

