

TESE

885

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

AÇÕES DE CONTROLE APLICADAS À ANÁLISE
DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

NUNO HENRIQUE MOURA NUNES BRITO

ITAJUBÁ, Dezembro de 1996

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**Ações de Controle Aplicadas à Análise de
Estabilidade de Tensão**

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Nuno Henrique Moura Nunes Brito

Itajubá, Dezembro de 1996

Ações de Controle Aplicadas à Análise de Estabilidade de Tensão

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:

Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:

Antônio Carlos Zambroni de Souza

Co-orientador:

José Wanderley Marangon Lima

Nuno Henrique Moura Nunes Brito

Itajubá, Dezembro de 1996

© 1996, Nuno Henrique Moura Nunes Brito

Ficha Catalográfica

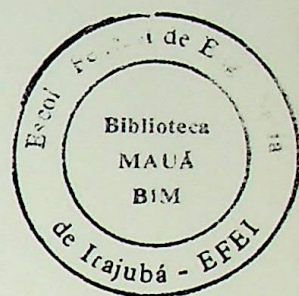
Brito, Nuno Henrique Moura Nunes

Ações de controle aplicadas à análise de estabilidade de tensão. Itajubá, 1996.

72p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Estabilidade de tensão I. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Departamento de Engenharia Elétrica II. t



*A meus filhos,
Letícia Maria e Marcelo Henrique*

AGRADECIMENTOS

A Deus, presente em todas as etapas deste trabalho.

A meus pais, Antônio Nunes Brito e Maria Inez de Brito Moraes, pela educação que tornou possível minha chegada até aqui.

A minha esposa, Maria Rita Amaral Brito, pelo carinho e compreensão.

Aos professores Antônio Carlos Zanetti de Souza e José Wanderley Maranhão Lima, pela orientação e amizade.

Aos meus parentes, João Ferreira de Lima Filho e Josias Mateus da Anália, pelo apoio prestado para a realização deste trabalho.

Ao amigo Antônio Neves Pinna, pelo incentivo constante.

Aos funcionários da PUC pelo carinho e atenção sempre dispensados.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na conclusão deste trabalho.

“Eu acredito demais na sorte. E tenho constatado que, quanto mais duro eu trabalho, mais sorte eu tenho.”

Thomas Jefferson

AGRADECIMENTOS

A Deus, presente em todas as etapas deste trabalho.

A meus pais, Antônio Nunes Brito e Maria Irene de Brito Moura, pela educação, que tornou possível minha chegada até aqui.

A minha esposa, Maria Rita Amaral Brito, pelo estímulo e compreensão.

Aos professores Antônio Carlos Zambroni de Souza e José Wanderley Marangon Lima, pela orientação e amizade.

Aos meus gerentes, João Ferreira de Lima Filho e Josias Matos de Araújo, pelo apoio prestado para a realização deste trabalho.

Ao amigo Antônio Simões Pires, pelo incentivo constante.

Aos funcionários da PPG, pelo carinho e atenção sempre dispensados.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

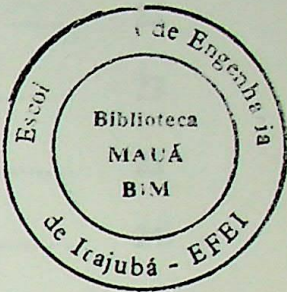
Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Resumo

“Abstract”



1	ESTABILIDADE DE TENSÃO: ASPECTOS GERAIS	1
1.1	Introdução	1
1.2	Caracterização do Fenômeno	2
1.2.1	Fatores de Influência	2
1.2.2	Mecanismo do Colapso de Tensão	6
1.3	Métodos de Análise	7
1.4	Modelo de Sistema Escolhido	9
1.5	Organização do Trabalho	10
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1	Introdução	12
2.2	Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular	12
2.3	Colapso de Tensão em um Sistema de Duas Barras	13
2.3.1	Curvas P-V	14
2.3.2	O Gráfico $V \times \theta$	16

3	TÉCNICAS PARA IDENTIFICAÇÃO DO PONTO DE COLAPSO DE TENSÃO E DA BARRA CRÍTICA	22
3.1	Introdução	22
3.2	Método da Continuação	23
3.2.1	Princípio Básico	23
3.2.2	Formulação Matemática	24
3.2.3	Previsor, Controle do Tamanho do Passo e Parametrização	24
3.2.4	Corretor	27
3.2.5	Síntese do Processo	27
3.3	Identificação da Barra Crítica	30
3.3.1	Determinante da Matriz Jacobiana Reduzida	30
3.3.2	Decomposição em Valores Singulares	33
3.3.3	Decomposição em Autovalores	35
3.3.4	Vetor Tangente	38
3.4	Metodologia Utilizada	40
4	DETERMINAÇÃO DE AÇÕES DE CONTROLE	46
4.1	Introdução	46
4.2	Determinação de Ações de Controle através de Geradores utilizando Matrizes de Sensibilidade	47
4.3	Resultados de Testes	50
4.3.1	Ações de Controle através de Geradores	50
4.3.2	Ações de Controle Local	56

5 CONCLUSÕES	60
5.1 Problema Examinado	60
5.2 Contribuições	60
5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros	62
Apêndice I - Determinação da Tensão e da Potência Ativa em uma Barra de Carga	63
Apêndice II - Equacionamento das Potências Ativa e Reativa em Função do Módulo e Ângulo da Tensão	65
Apêndice III - Regra de Schur	67
Bibliografia	68

Lista de Figuras

Figura 2.1	Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade angular	12
Figura 2.2	Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade de tensão	13
Figura 2.3	Sistema elétrico em análise	14
Figura 2.4	Relação entre o módulo da tensão na carga e a potência ativa para diferentes fatores de potência	15
Figura 2.5	Gráfico $V \times \theta$ mostrando três níveis de carga com o mesmo fator de potência	17
Figura 3.1	Processo do método da continuação	27
Figura 3.2	Um fluxograma do fluxo de potência através do método da continuação	29
Figura 3.3	Mínimo valor singular e mínimo autovalor absoluto	41
Figura 3.4	Determinante do Jacobiano reduzido D_t' avaliado para uma barra não-crítica (192)	41
Figura 3.5	Determinante do Jacobiano reduzido D_t' avaliado para a barra crítica (526)	42
Figura 3.6	Componentes do vetor tangente	44
Figura 4.1	Curvas P-V da barra 192 - Casos sem limites	51
Figura 4.2	Curvas P-V para as barras 526 e 192 - Caso com limites	53
Figura 4.3	Curvas P-V da barra 526 - Casos com limites	54
Figura 4.4	Sistema IEEE-300 barras nas proximidades da barra 526	55

Figura 4.5	Curvas P-V da barra 526 - com compensador estático ou banco de capacitores	58
Figura 4.6	Representação de um compensador estático de ± 50 MVar em um programa de fluxo de potência	59
Figura I.1	Circuito equivalente para o sistema em análise	63
Tabela 4.1	Evolução do número de barras de tensão controlada por função de sobrecarga do sistema	12
Tabela 4.2	Ponto de colapso de tensão com banco de capacitores instalado	56

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Identificação da barra crítica	45
Tabela 4.1	Evolução do número de barras de tensão controlada em função da sobrecarga no sistema	52
Tabela 4.2	Ponto de colapso de tensão com banco de capacitores instalado	56

Resumo

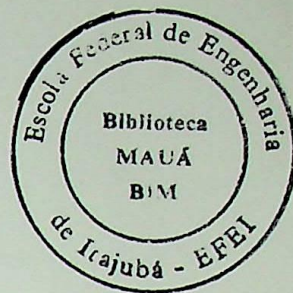
Este trabalho aborda o fenômeno da estabilidade de tensão, o qual vem sendo um ponto de crescente interesse nos últimos anos. Restrições econômicas e ecológicas têm acarretado a operação de muitos sistemas elétricos sob condições cada vez mais severas, levando à ocorrência de diversos incidentes por todo o mundo envolvendo problemas de instabilidade de tensão.

A determinação da barra crítica de um sistema é discutida, onde a técnica do vetor tangente é proposta para esse fim. Essa técnica é comparada com outras de mesma finalidade e as características principais de cada uma delas são relatadas. Por barra crítica entende-se aquela barra cujas variáveis de estado variem com maior intensidade no ponto de colapso de tensão.

Um fluxo de potência através do método da continuação é utilizado para obter-se curvas P-V e determinar-se o ponto de colapso de tensão de um sistema elétrico de potência, o que permite avaliar o grau de segurança de tensão desse sistema.

Ações de controle para prevenção do colapso de tensão são então propostas, baseadas no conhecimento da barra crítica. Uma técnica fundamentada em relações de sensibilidade é desenvolvida para definir ações de controle através de geradores. Essas ações de controle são testadas no sistema IEEE-300 barras, onde os limites de potência reativa dos geradores são considerados. Os resultados são comparados com aqueles obtidos através de ações de controle local.

Abstract



This work broaches of the voltage stability phenomena, which has become a point of increased interest over the last few years. Economical and environmental constraints have caused the operation of many power systems under increasingly stressed conditions and incidents all around the world have taken place due to voltage instability.

The critical bus determination of a system is discussed and the tangent vector technique is proposed for this task. This technique is compared with others and the main features of each one are reported. By critical bus one means that bus whose state variables vary at most at the voltage collapse point.

A continuation power flow is used to trace P-V curves and to determine the voltage collapse point of a power system, leading one to evaluate the system voltage security.

Control actions to prevent voltage collapse are proposed, based on the knowledge of the critical bus. A technique based on sensitivity relations is developed to determine control actions through generators. These control actions are carried out in the IEEE 300-bus system, where the generators reactive power limits are considered. The results are compared with those obtained by local control actions.



Capítulo 1

ESTABILIDADE DE TENSÃO: CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 Introdução

Problemas relacionados a instabilidade de tensão em sistemas de potência são atualmente uma das principais preocupações no planejamento e operação de diversos sistemas elétricos em todo o mundo. Uma das causas para o crescente interesse pelo tema tem sido o aumento de carga sem um correspondente incremento da capacidade de transmissão, levando muitos sistemas a operarem próximos a seus limites de estabilidade de tensão.

Estabilidade de tensão é definida em [1] como a capacidade de um sistema de potência manter níveis de tensão aceitáveis em todas as barras, em condições normais e após ser submetido a um distúrbio.

Instabilidade de tensão é a ausência de estabilidade de tensão e resulta em um progressivo declínio da tensão [2]. A instabilidade de tensão poderá levar um sistema ao colapso de tensão se as tensões pós-distúrbio, em todo o sistema ou parte do mesmo, tornarem-se instáveis ou atingirem valores de equilíbrio a níveis abaixo dos limites aceitáveis [2].

A ocorrência de alguns incidentes envolvendo problemas de estabilidade de tensão fez com que o tema ganhasse destaque a nível mundial nos últimos anos. Dentre esses eventos pode-se citar os seguintes:

- Incidente na Dinamarca, em 02/03/79
- Incidente na Suécia, em 27/12/83

- Incidente na Checoslováquia, em 05/07/85
- Incidente na Inglaterra, em 20/05/86

A referência [2], que descreve em detalhes essas ocorrências, mostra que cada uma delas originou-se por razões diferentes, bem como os tempos envolvidos nos eventos também são diferenciados. Isso deu margem a discussões a respeito da natureza do fenômeno.

Neste capítulo o tema “estabilidade de tensão” será abordado de forma a apresentar uma descrição geral do fenômeno, com o objetivo de proporcionar uma compreensão do mesmo, bem como o de relatar algumas publicações recentes relativas ao tema. Ao final do capítulo será apresentado o modelo de sistema utilizado e a forma como este trabalho está organizado.

1.2 Caracterização do Fenômeno

Os problemas de estabilidade de tensão estão associados a sistemas elétricos que operam sob condições estressantes, tais como: linhas de transmissão com carregamentos elevados, fontes locais de potência reativa insuficientes e transmissão de potência através de grandes distâncias. Aspectos econômicos e ambientais têm contribuído para o crescente número de sistemas de potência operando sob essas condições.

A seguir serão mostradas as características dos elementos de um sistema de potência que são de interesse para a compreensão do processo de colapso de tensão, bem como será feita uma descrição de um dos possíveis cenários desse processo.

1.2.1 Fatores de Influência

Nesta seção será descrito de forma resumida como alguns fatores influem na estabilidade de tensão.

Dentre os principais desses fatores pode-se citar os seguintes [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]:

Capacidade dos Geradores:

Os geradores têm sua capacidade de fornecimento de potência reativa limitada pelas correntes de campo e armadura. Assim sendo, embora transitoriamente venham a fornecer potência reativa além desses limites, a atuação de seus reguladores de tensão provocará a redução dessa potência em um instante posterior.

Características das Linhas de Transmissão:

Uma linha de transmissão apresenta um comportamento diferenciado em função de seu carregamento. Ela produz potência reativa proporcionalmente ao quadrado da tensão e consome potência ativa e reativa, proporcionalmente ao quadrado da corrente. Dessa forma, a potência reativa líquida proporcionada por uma linha de transmissão variará com seu ciclo de carga, sendo as condições de carga pesada as mais críticas sob o aspecto de estabilidade de tensão, quando as perdas elétricas e quedas de tensão podem tornar-se elevadas.

Compensadores de Potência Reativa:

Os bancos de capacitores “shunt”, apesar de melhorarem o suporte local de potência reativa, têm o inconveniente de fornecer essa potência como função do quadrado da tensão. Portanto, podem não produzir bons resultados em condições de operação com tensões baixas. Mesmo os compensadores estáticos, apesar de proporcionarem maior flexibilidade, ao atingirem seus limites de geração de potência reativa tornam-se simples capacitores “shunt”.

Quanto aos capacitores série, que tradicionalmente têm sido associados com longas linhas de transmissão para proporcionarem benefícios do ponto de vista da estabilidade angular, reduzindo o ângulo de fase entre os terminais transmissor e receptor, hoje em dia também vêm encontrando aplicações em linhas mais curtas para melhorar a estabilidade de tensão. Isso decorre da característica de autorregulação inerente dos capacitores série, haja vista que produzem potência reativa proporcionalmente ao quadrado da corrente e independentemente da tensão nas barras, possibilitando reduzir a queda de tensão resultante da reatância da linha. Assim sendo, eles destacam-se por serem tão mais efetivos quanto mais se

necessita de compensação. Entretanto, o fato de propiciarem o aparecimento de ressonância subsíncrona e a necessidade da utilização de dispositivos especiais de proteção contra sobretensões decorrentes de curto-circuito na rede elétrica são as desvantagens dos capacitores série [8]. De forma similar à compensação “shunt”, uma maior flexibilidade pode ser obtida através do uso de compensação série controlável.

Característica das Cargas:

Alguns tipos de carga, como por exemplo iluminação incandescente, apresentam um comportamento de variação da potência com o quadrado da tensão e são denominadas cargas tipo impedância constante. Outras, como por exemplo motores, não variam significativamente suas potências com a tensão, chamando-se cargas tipo potência constante.

A modelagem da carga total de uma subestação deve, portanto, levar em conta a sua composição, sendo usual a representação por um modelo composto que considere parcelas de carga com diferentes comportamentos em função da tensão. Cargas industriais, onde predomina o comportamento do tipo potência constante, são mais críticas sob o aspecto de estabilidade de tensão. Por outro lado, cargas residenciais, que de uma maneira geral apresentam redução de suas potências sob situações de queda de tensão, proporcionam uma certa “autocorreção”, sendo portanto mais favoráveis do ponto de vista de estabilidade de tensão. Cabe ressaltar que a utilização intensiva de condicionadores de ar pode mudar bastante o comportamento das cargas residenciais [9].

Também é importante destacar que algumas cargas, apesar de em um primeiro momento apresentarem redução de suas potências com a queda da tensão, podem, alguns instantes depois, elevar suas potências, quer pela presença de transformadores com taps comutáveis sob carga junto às mesmas, quer por usarem termostatos [1, 5].

Observa-se, portanto, que o comportamento da carga tem grande influência na análise de estabilidade de tensão, tornando importante uma correta modelagem.

Os modelos representativos do comportamento da carga com a tensão são tradicionalmente classificados em duas categorias: modelos estáticos e modelos dinâmicos.

Os modelos estáticos de carga expressam as potências ativa e reativa de uma barra em um determinado instante de tempo como função da magnitude da tensão nessa barra para o mesmo instante. Esses modelos são usados para representar componentes essencialmente estáticos da carga, por exemplo, cargas de aquecimento e iluminação, e como uma aproximação para componentes dinâmicos da carga, por exemplo, cargas acionadas por motores. Um modelo estático bastante utilizado é o modelo polinomial, no qual as cargas ativa e reativa são expressas através das seguintes equações algébricas:

$$\begin{aligned} P &= P_o \left[a_1 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_o} \right) + a_3 \right] \\ Q &= Q_o \left[a_4 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + a_5 \left(\frac{V}{V_o} \right) + a_6 \right] \end{aligned} \quad (1.1)$$

onde **P** e **Q** são as componentes de potência ativa e reativa da carga quando a magnitude da tensão na barra é **V** e o subscrito **o** identifica os valores das respectivas variáveis na condição inicial de operação. Os parâmetros desse modelo são os coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 e a_6 , os quais definem as proporções das parcelas de carga que se comportam como impedância constante (a_1 e a_4), corrente constante (a_2 e a_5) e potência constante (a_3 e a_6).

Os modelos dinâmicos de carga expressam as potências ativa e reativa de uma barra em um determinado instante de tempo como função da magnitude da tensão nessa barra em um instante passado de tempo e, usualmente, incluindo o instante presente. Cargas constituídas essencialmente por motores, onde a resposta a um distúrbio não ocorre instantaneamente, mas sim com determinada constante de tempo, podem requerer esses modelos, cuja representação requer o uso de equações diferenciais.

Destaca-se que sob o ponto de vista da fidelidade da representação da carga, a maneira mais apropriada para identificar-se seu modelo seria através de testes nas diversas subestações de um sistema. Entretanto, tal procedimento é de difícil execução, haja vista que as empresas relutam em permitir que seus consumidores sejam submetidos a distúrbios voluntários. Adicionalmente, a composição da carga de uma subestação pode variar em função do horário, o que exigiria repetidos testes para cada subestação.

Assim sendo, a tendência predominante tem sido a de recorrer-se a outros expedientes, tais como levantamento das características das cargas com base na sua composição por classe de consumidores (industrial, comercial e residencial), bem como baseando-se na reprodução de determinadas ocorrências registradas.

1.2.2 Mecanismo do Colapso de Tensão

Vista a influência isolada dos principais elementos constituintes de um sistema elétrico de potência sobre a estabilidade de tensão pode-se, então, fazer uma descrição do comportamento conjunto, com o processo do colapso de tensão sendo explicado fisicamente.

O colapso de tensão é um fenômeno local que se espalha pela vizinhança [1, 10]. O intervalo de tempo entre o distúrbio inicial e o colapso de tensão pode ser de uma fração de segundo até dezenas de minutos. Embora o processo de instabilidade de tensão possa acontecer de diversas formas, descrever-se-á a seguir um dos cenários clássicos desse processo [3].

Um distúrbio, como por exemplo perda de grandes geradores em uma área de carga, perda de bancos de capacitores ou compensadores estáticos estratégicos ou perda de linhas de transmissão importantes, causa um aumento nas perdas de potência reativa e a tensão nas áreas de carga cai. Na medida em que tapes de transformadores junto às cargas agem para restaurar a tensão nas mesmas, as tensões no sistema de transmissão são reduzidas ainda mais. As unidades geradoras mais próximas, que temporariamente são sobreexcitadas, têm suas excitações retornadas a níveis compatíveis com suas capacidades. Geradores mais distantes

devem então proporcionar potência reativa, o que é pouco eficiente. Paralelamente, bancos de capacitores “shunt” têm suas potências reativas reduzidas com a tensão, o mesmo verificando-se com a potência reativa produzida pela susceptância das linhas de transmissão. A geração e o sistema de transmissão não podendo mais suportar a carga e as perdas reativas acarretará um decaimento rápido da tensão, com o sistema entrando em um colapso parcial ou total.

1.3 Métodos de Análise

A estabilidade de tensão vem sendo estudada sob o ponto de vista estático e dinâmico, sendo a escolha da abordagem dependente da análise a ser efetuada.

As características principais dessas duas abordagens são as seguintes [11, 12, 13]:

a) Análise Dinâmica

A análise dinâmica usa técnicas não-lineares de simulação no domínio do tempo ou frequência, proporcionando uma reprodução real da dinâmica da instabilidade de tensão. É importante para estudos envolvendo coordenação de controles e proteções, bem como análises de situações específicas de colapso de tensão.

b) Análise Estática

Embora a estabilidade de tensão seja um fenômeno dinâmico, devido à sua complexidade, ao tempo computacional necessário para simulações dinâmicas de grandes sistemas de potência e ao fato das dinâmicas envolvidas muitas vezes serem lentas, ferramentas estáticas têm sido utilizadas para sua análise. As referências [14, 15] mostram que a análise do colapso de tensão por abordagens estáticas ou dinâmicas levam a resultados semelhantes.

A análise estática é baseada em equações de fluxo de potência, não envolvendo, portanto, equações diferenciais. Essa forma de análise é importante para proporcionar respostas a respeito da “distância” de um ponto de operação à instabilidade e sobre a identificação da origem do problema, de forma a serem definidas medidas corretivas e/ou preventivas. Adicionalmente, em uma análise de estabilidade de tensão frequentemente é necessário avaliar uma ampla faixa de

condições do sistema, tornando atraente uma análise de regime permanente, cujo custo computacional é menor.

A avaliação da bibliografia relativa a análises de estabilidade de tensão mostra que existem diferentes linhas de pesquisas, sem que haja um consenso sobre qual a técnica mais adequada. Entretanto, apesar do problema de estabilidade de tensão ainda necessitar de desenvolvimentos adicionais, é possível observar algumas tendências nas análises publicadas. Dessa forma, a seguir serão mencionadas algumas publicações encontradas na literatura e que são consideradas importantes para o desenvolvimento do presente trabalho.

A referência [14] apresenta uma relação entre o modelo dinâmico linearizado de um sistema de potência e o modelo de fluxo de potência convencional. Esse trabalho, que é um aprofundamento da análise apresentada em [16], demonstra que existe uma relação direta entre a singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência e a singularidade da matriz de estado dinâmica do sistema. O Jacobiano do fluxo de potência fornece informação sobre a existência de ponto de equilíbrio para um nível de carga especificado e sua singularidade, apesar de não detectar instabilidades associadas a características das máquinas síncronas e seus controles, possibilita detectar o máximo carregamento de um sistema de potência.

Assim sendo, diversos trabalhos têm sido publicados com base na análise da matriz Jacobiana do fluxo de potência. As referências [17] e [18] mostram como o ponto de colapso de tensão pode ser identificado através da decomposição da matriz Jacobiana do fluxo de potência em valores singulares e autovalores, respectivamente. Em [17], particularmente, os autores demonstram que a análise por valores singulares de uma matriz Jacobiana reduzida com respeito às equações de potência reativa proporciona melhores resultados que a análise da matriz Jacobiana completa do fluxo de carga. Essa redução é também empregada na análise por autovalores apresentada na referência [18]. Como essa matriz apresenta uma quase-simetria, as análises por autovalores e valores singulares tornam-se idênticas. O mínimo valor singular e o menor autovalor de tais matrizes reduzidas são propostos como índices para detectar a proximidade do colapso de tensão. A referência [19], entretanto, mostra que para alguns casos essas técnicas podem não indicar convenientemente essa proximidade.

Análises baseadas na redução da matriz Jacobiana do fluxo de potência em relação a cada barra de carga do sistema são propostas em [20, 21, 22], onde o determinante dessa matriz é proposto como índice de segurança de tensão. Um problema com essa técnica refere-se ao fato desse determinante só produzir bons resultados para detectar a proximidade do colapso de tensão se a barra crítica do sistema for conhecida. Por barra crítica entende-se aquela onde o sistema é mais vulnerável. Entretanto, a determinação dessa barra não é trivial.

As referências [10, 23, 24] utilizam a técnica do vetor tangente nas análises de estabilidade de tensão, onde a barra associada a maior entrada nesse vetor é identificada como a barra crítica de um sistema. As vantagens dessa técnica são a simplicidade de obtenção do vetor tangente e uma precoce identificação da barra crítica. Tal técnica foi recentemente proposta como índice de avaliação da proximidade do colapso de tensão [25].

A fim de proporcionar informações quanto a “distância” de um ponto de operação ao ponto de colapso de tensão (margem de carga), tem sido utilizado o método da continuação [26, 27, 28]. Esse método determina o ponto de colapso de tensão com precisão e o mau-condicionamento da matriz Jacobiana é superado através de uma técnica de parametrização. Entretanto, esse método pode ser computacionalmente lento para grandes sistemas de potência.

As informações referentes à barra crítica e à margem de carga podem ser de interesse para a determinação de ações de controle. As referências [29, 30] propõem ações de controle baseadas em matrizes de sensibilidade do sistema, onde os resultados obtidos visam a melhoria da operação do sistema. Caso essas ações não sejam capazes de proporcionar bons ganhos relativos à estabilidade de tensão do sistema, ações de controle local podem ser utilizadas, como a instalação de compensadores de potência reativa [10]. Numa ação mais drástica, corte de carga pode vir a ser empregado [31].

1.4 Modelo de Sistema Escolhido

O modelo dinâmico de um sistema de potência pode ser representado através de um conjunto de equações diferenciais da seguinte forma geral:

$$\dot{x} = f(x) \quad (1.2)$$

onde x representa as variáveis de estado do sistema.

Assumindo-se que o sistema desloca-se lentamente de um ponto de equilíbrio para outro a medida que a carga é lentamente variada, pode-se considerar a análise estática satisfatória para estudar a estabilidade do sistema. Isso implica considerar a tensão terminal dos geradores constante, enquanto estiverem dentro de suas capacidades de potência reativa, o que representa alguns dos efeitos de um regulador de tensão.

Assim sendo, as derivadas das variáveis de estado em relação ao tempo (\dot{x}) podem ser consideradas iguais a zero e a Equação 1.2 reduz-se a uma equação puramente algébrica para cada ponto de equilíbrio, isto é,

$$f(x) = 0 \quad (1.3)$$

permitindo o uso de técnicas de análise estática para avaliação do “retrato” do sistema em um certo instante de tempo.

Portanto, as considerações feitas nesta seção permitem que a análise de estabilidade de tensão seja desenvolvida considerando-se apenas o modelo de sistema utilizado nos estudos de fluxo de potência e esse modelo será usado neste trabalho.

1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho fará uma análise estática da estabilidade de tensão, com o objetivo de propor ações de controle que visem aumentar a “distância” de um ponto de operação ao colapso de tensão, e está organizado conforme descrito a seguir.

O capítulo 2 apresenta alguns conceitos básicos do problema da estabilidade de tensão, onde um sistema de duas barras é utilizado. No capítulo 3 é feita uma descrição do método da continuação, que será usado para prever o ponto de colapso, bem como de algumas das técnicas que permitem localizar a origem do fenômeno, tais como, determinante da matriz Jacobiana reduzida, decomposição em valores singulares, decomposição em autovalores e vetor tangente, definindo-se ao seu final a metodologia considerada mais adequada. No capítulo 4 é desenvolvida uma técnica para definir

ações de controle e os resultados de testes efetuados no sistema IEEE-300 barras são apresentados. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para desenvolvimentos futuros.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar alguns conceitos básicos relacionados ao tema "estabilidade de tensão". Inicialmente será feita uma comparação da estabilidade angular com a estabilidade de tensão e, em seguida, o problema de estabilidade de tensão será exposto através da análise de um sistema bastante simples.

2.2 Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular

A estabilidade de tensão e a estabilidade angular estão interligadas. A estabilidade de tensão transitória está diretamente relacionada com a estabilidade angular transitória e formas mais lentas de estabilidade de tensão estão relacionadas com a estabilidade devido a pequenas perturbações. Frequentemente é difícil separar os mecanismos.

Entretanto, existem casos onde uma forma de instabilidade predomina. A referência [3] apresenta duas situações extremas:

- a) Um gerador síncrono conectado a um grande sistema por uma linha de transmissão: "estabilidade permanente angular" (potência máquina - barra infinito).

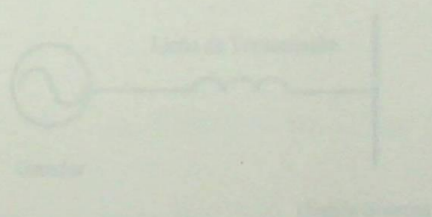


Figura 2.1 Exemplo simples envolvendo um caso extremo de estabilidade angular.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar alguns conceitos básicos relacionados ao tema “estabilidade de tensão”. Inicialmente será feita uma comparação da estabilidade angular com a estabilidade de tensão e, em seguida, o problema da estabilidade de tensão será exposto através da análise de um sistema bastante simples.

2.2 Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular

A estabilidade de tensão e a estabilidade angular estão interligadas. A estabilidade de tensão transitória está geralmente relacionada com a estabilidade angular transitória e formas mais lentas de estabilidade de tensão estão relacionadas com a estabilidade devido a pequenas perturbações. Frequentemente é difícil separar os mecanismos.

Entretanto, existem casos onde uma forma de instabilidade predomina. A referência [3] apresenta duas situações extremas:

- a) Um gerador síncrono conectado a um grande sistema por uma linha de transmissão: estabilidade puramente angular (problema máquina - barra infinita).

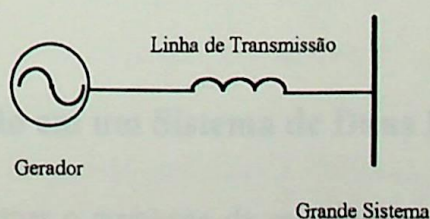


Figura 2.1 Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade angular

- b) Um gerador síncrono ou um grande sistema conectado por uma linha de transmissão a uma carga assíncrona: estabilidade puramente de tensão.

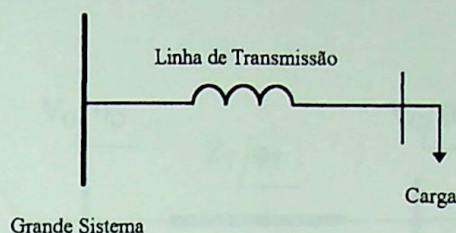


Figura 2.2 Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade de tensão

Enquanto a estabilidade de tensão preocupa-se com as áreas de carga e características da carga, a estabilidade angular frequentemente tem interesse na interligação de usinas remotas com grandes sistemas. Por isso, enquanto na estabilidade angular o objetivo é manter os geradores em sincronismo, a estabilidade de tensão diz respeito às áreas de carga, sendo por isso muitas vezes designada como estabilidade das cargas [3, 32].

As duas formas de estabilidade podem ou não estar presentes em um mesmo distúrbio. É possível detectar colapso de tensão em uma área de um grande sistema interligado sem perda de sincronismo de qualquer dos geradores.

A estabilidade de tensão transitória é usualmente associada com a estabilidade angular transitória, enquanto a estabilidade de tensão de longo termo é menos relacionada com a estabilidade angular.

Pode-se dizer que se a tensão entra em colapso em um ponto do sistema longe de cargas, existe um problema de estabilidade angular. Entretanto, se a tensão entra em colapso em uma área de carga, existe provavelmente um problema de estabilidade de tensão [3].

2.3 Colapso de Tensão em um Sistema de Duas Barras

Com a finalidade de conceituar o problema da estabilidade de tensão, será analisado inicialmente o comportamento estático de um sistema elétrico simples de duas barras.

Tal sistema é composto de um gerador com capacidade infinita de geração, uma carga efetiva $P + jQ$ e uma linha de transmissão sem limite térmico, conforme apresentado na Figura 2.3.

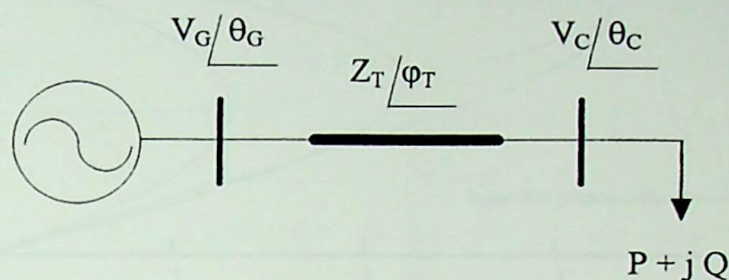
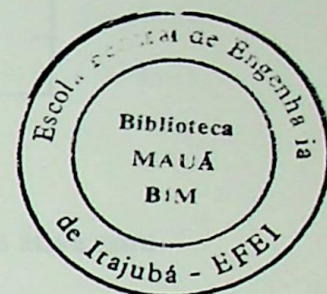


Figura 2.3 Sistema elétrico em análise



2.3.1 Curvas P-V

Esta seção tem por objetivo obter uma solução analítica para o circuito apresentado na Figura 2.3 e então traçar as tradicionais curvas P-V, que ilustrarão a relação entre o módulo da tensão e a carga ativa para a barra receptora, considerando-se diferentes fatores de potência, e a partir das quais algumas características importantes poderão ser evidenciadas.

Considerou-se o gerador como uma barra infinita cuja tensão terminal, em pu, foi admitida igual a $1.00 / 0^\circ$.

A linha de transmissão foi representada como uma linha curta, ou seja, um ramo RL série, de impedância igual a $6.02 + j 15.68 \%$.

No Apêndice I apresenta-se o equacionamento do circuito, o qual foi utilizado para obter-se, através do programa MATHCAD [33], as curvas apresentadas na Figura 2.4, relacionando o módulo da tensão na barra de carga com a potência ativa consumida nessa barra, para cargas com fatores de potência 0.8, indutivo e capacitivo, e 1.0.

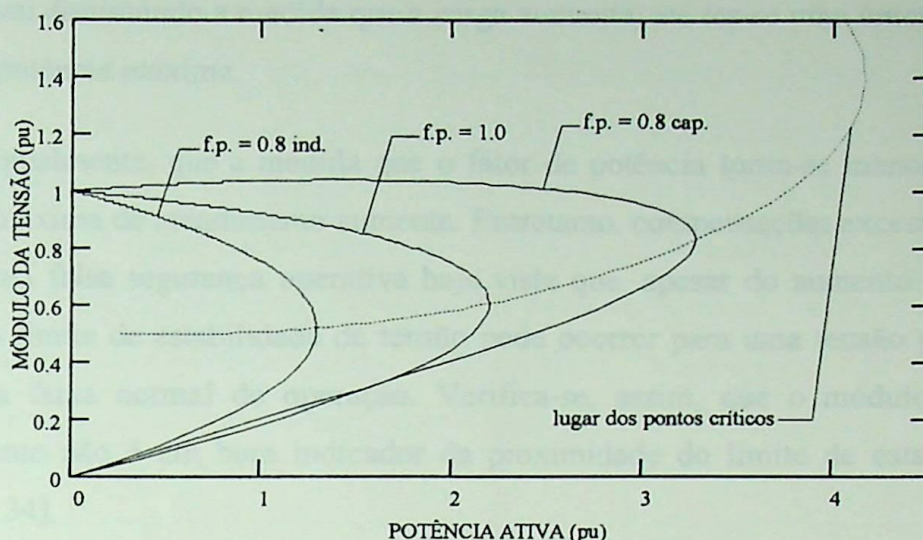


Figura 2.4 Relação entre o módulo da tensão na carga e a potência ativa para diferentes fatores de potência

A partir da Figura 2.4 pode-se observar que para cada fator de potência existem dois valores de tensão para um mesmo valor de potência na carga, exceto em um ponto onde um único valor de tensão está relacionado à carga, ponto esse que representa a máxima potência de atendimento, apesar da fonte ter sido considerada infinita. Esse ponto corresponde ao limite de estabilidade de tensão, também citado muitas vezes na literatura como ponto de bifurcação ou ponto de singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga [19, 20, 21, 22, 24, 26]. A singularidade da matriz Jacobiana será mostrada adiante.

A existência de duas soluções de tensão para uma mesma potência pode ser explicada pela também existência de dois valores de corrente para uma mesma potência, ou seja, para pontos de operação correspondentes a parte superior da curva tem-se tensão maiores e correntes menores que para pontos correspondentes a região inferior da curva onde com tensões menores é necessária uma intensidade maior de corrente para produzir uma certa potência.

Também é interessante observar que a tensão vai apresentando quedas cada vez maiores para uma mesma variação de carga, a medida que essa carga vai-se aproximando de seu valor máximo e que a distância entre as duas soluções de tensão para uma mesma

potência vai diminuindo a medida que a carga aumenta, até ter-se uma única solução no ponto de potência máxima.

Nota-se, igualmente, que a medida que o fator de potência torna-se menos indutivo a potência máxima de atendimento aumenta. Entretanto, compensações excessivas podem levar a uma falsa segurança operativa haja vista que, apesar do aumento na potência suprida, o limite de estabilidade de tensão pode ocorrer para uma tensão próxima, ou dentro, da faixa normal de operação. Verifica-se, assim, que o módulo da tensão isoladamente não é um bom indicador da proximidade do limite de estabilidade de tensão [4, 34].

A Figura 2.4 mostra ainda a curva dos pontos críticos (limites de estabilidade de tensão) para cada fator de potência, onde verifica-se que existe uma determinada compensação de potência reativa além da qual a potência ativa máxima não aumenta, passando inclusive a diminuir. Esse ponto de máxima potência ativa é o limite de estabilidade estática e decorre do fato da máxima absorção de potência ativa por uma impedância de carga ocorrer quando essa impedância é igual em módulo e conjugada em ângulo, em relação a impedância série da linha de transmissão [20, 35]. Isso corresponde, nesse caso, a uma carga de $4.15 - j 10.82$ pu. Ressalta-se que não houve preocupação, no caso apresentado, com o fato desse ponto ocorrer para um valor de tensão não operativo na prática, mas apenas em caracterizar a situação através de uma fácil visualização, mostrando que o limite de estabilidade estática é um caso particular do limite de estabilidade de tensão.

2.3.2 O Gráfico $V \times \theta$

Nesta seção o sistema de duas barras apresentado na Figura 2.3 é mais uma vez utilizado para traçar-se o gráfico $V \times \theta$ [20, 21, 24, 29, 35], que permite representar em um único gráfico as quatro variáveis associadas à barra de carga: as cargas ativa e reativa e o módulo e ângulo da tensão. Dentre as informações que podem ser obtidas a partir desse gráfico destaca-se a utilização da singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga como indicador do limite de estabilidade de tensão.

No Apêndice II apresenta-se o equacionamento utilizado para obter-se, através do programa MATHCAD [33], as curvas apresentadas na Figura 2.5. Nessa figura, a curva P_i , para $i = 1, 2$ e 3 , é o lugar geométrico das tensões na barra de carga, em módulo e ângulo, para carga ativa constante e carga reativa variável, ou seja, com fator de potência variável, onde considerou-se $P_1 < P_2 < P_3$. Similarmente, a curva Q_i , para $i = 1, 2$ e 3 , é o lugar geométrico das tensões na barra de carga, em módulo e ângulo, para carga reativa constante e carga ativa variável, ou seja, com fator de potência também variável, onde considerou-se cargas reativas indutivas tal que $Q_1 < Q_2 < Q_3$.

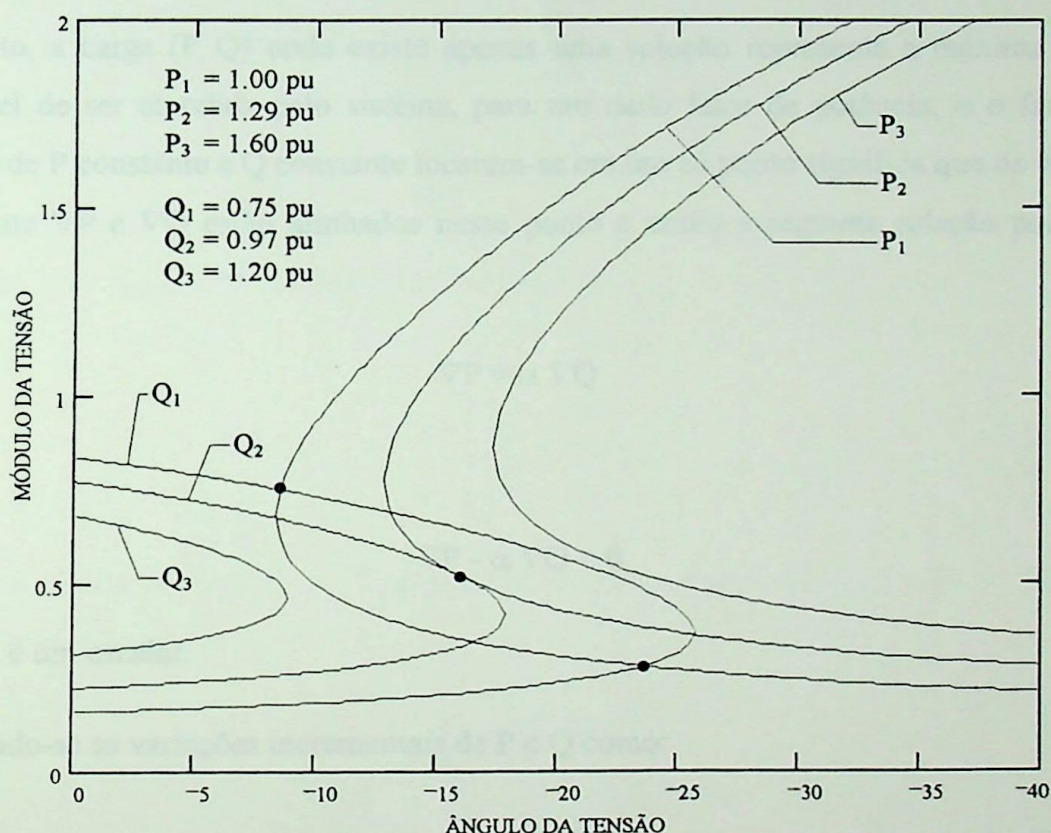


Figura 2.5 Gráfico $V \times \theta$ mostrando três níveis de carga com o mesmo fator de potência

As interseções das curvas de P e Q no plano (V, θ) definem os pontos de operação de regime permanente do sistema, os quais são soluções do fluxo de potência. Assim sendo, pode-se observar, da Figura 2.5, que para uma carga qualquer (P_i, Q_i) , onde o fator de potência é mantido constante, existem três cenários possíveis com relação à solução de fluxo de potência (V_i, θ_i) :

- a) Dupla solução para (P_1, Q_1) .
- b) Solução única para (P_2, Q_2) .
- c) Nenhuma solução para (P_3, Q_3) .

Logo, da mesma forma que observado na seção 2.3.1, através das curvas P-V, verifica-se que há uma carga para a qual apenas uma solução existe e que cargas superiores a essa não têm solução, caracterizando ausência de um ponto de equilíbrio. Cargas inferiores a máxima apresentam dupla solução.

Portanto, a carga (P, Q) onde existe apenas uma solução representa a máxima carga possível de ser atendida pelo sistema, para um dado fator de potência, e o fato das curvas de P constante e Q constante tocarem-se em um só ponto significa que os vetores gradiente ∇P e ∇Q estão alinhados nesse ponto e então a seguinte relação pode ser escrita:

$$\nabla P = \alpha \nabla Q \quad (2.1)$$

ou

$$\nabla P - \alpha \nabla Q = 0 \quad (2.2)$$

onde α é um escalar.

Definindo-se as variações incrementais de P e Q como:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V \\ \Delta Q &= \frac{\partial Q}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V \end{aligned} \quad (2.3)$$

Então, os vetores gradiente de P e Q são:

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

$$\nabla Q = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}$$

A partir da Equação 2.2 tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \alpha \frac{\partial Q}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial V} - \alpha \frac{\partial Q}{\partial V} &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Como o Jacobiano do fluxo de potência é dado por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Então, a solução da Equação 2.5 requer que o determinante do Jacobiano do fluxo de potência seja igual a zero, isto é:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \frac{\partial Q}{\partial V} - \frac{\partial P}{\partial V} \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (2.7)$$

Portanto, isso significa que no ponto de máxima carga o Jacobiano torna-se singular.

O fato do Jacobiano do fluxo de potência ser singular no limite de estabilidade de tensão fornece ainda informações importantes com relação a seus autovalores.

Seja a matriz Jacobiana J uma matriz quadrada, real, de dimensão $n \times n$. A sua decomposição em autovalores é expressa como:

$$J = X \Lambda Y^T \quad (2.8)$$

onde X e Y são matrizes ortonormais de ordem $n \times n$, denominadas de matrizes dos autovetores a direita e a esquerda, respectivamente, e Λ é uma matriz diagonal com os autovalores λ_i da matriz J , para i variando de 1 a n .

Assim sendo, tem-se que:

$$\det(J) = \det(X \Lambda Y^T) \quad (2.9)$$

Como X , Λ e Y^T são matrizes quadradas de mesma dimensão, da álgebra linear pode-se escrever que:

$$\det(J) = \det(X) \det(\Lambda) \det(Y^T) \quad (2.10)$$

$$\det(J) = \det(X) \det(Y^T) \det(\Lambda) \quad (2.11)$$

$$\det(J) = \det(X Y^T) \det(\Lambda) \quad (2.12)$$

Das propriedades das matrizes modais tem-se que:

$$X Y^T = I \quad (2.13)$$

onde I é a matriz identidade.

Assim sendo, a Equação 2.12 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\det(J) = \det(I) \det(\Lambda) \quad (2.14)$$

Como o determinante de uma matriz diagonal é dado pelo produto de seus elementos da diagonal, então:

$$\det(I) = 1 \quad (2.15)$$

e

$$\det(\Lambda) = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n \quad (2.16)$$

Portanto,

$$\det(J) = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n \quad (2.17)$$

Dessa forma, observa-se que no caso da matriz Jacobiana J ser singular, ou seja, seu determinante ser nulo, então pelo menos um dos seus autovalores será nulo. Assim sendo, no limite de estabilidade de tensão pelo menos um dos autovalores do Jacobiano do fluxo de potência é zero.

De modo semelhante poder-se-ia mostrar que pelo menos um dos valores singulares da matriz Jacobiana se anula no limite de estabilidade de tensão.

Alguns trabalhos baseados na teoria discutida nesta seção são encontrados na literatura [17, 18, 19, 20, 21, 22, 24].



Capítulo 3

TÉCNICAS PARA IDENTIFICAÇÃO DO PONTO DE COLAPSO DE TENSÃO E DA BARRA CRÍTICA

3.1 Introdução

Em análise de estabilidade de tensão é muitas vezes importante a determinação da margem de carga de um sistema, ou seja, a quantidade de carga que ao ser acrescentada à carga atual faz com que o sistema atinja o limite de estabilidade de tensão de regime permanente (ponto crítico). Essa informação permite ao operador avaliar o grau de segurança de tensão de um sistema elétrico, uma vez que a “distância” até o ponto de colapso é conhecida.

Para esse fim, ao longo deste trabalho será utilizado o programa PFLOW [26], através do qual são obtidas soluções de fluxo de potência com base em uma técnica denominada “método da continuação”. Em função disso, neste capítulo será feita uma breve descrição desse método, onde tem-se por objetivo mostrar como o mesmo funciona e o motivo de sua utilização.

Visto, também, que o colapso de tensão tem sido reconhecido como um fenômeno que inicia localmente e se espalha pela vizinhança [1, 10], um outro aspecto importante na análise de estabilidade de tensão é a identificação da barra crítica do sistema, ou seja, aquela barra cuja variação de carga produz maior variação de tensão. Essa informação, que sinaliza qual(is) o(s) ponto(s) vulnerável(eis) do sistema, pode ser de interesse para a determinação de ações de controle, indicando a área do sistema onde atuar. Para esse fim, diversas técnicas têm sido desenvolvidas e neste capítulo serão apresentadas algumas delas, definindo-se, ao final, aquela que será utilizada nesse trabalho.

3.2 Método da Continuação

Uma forma simples de se determinar a margem de carga de um sistema poderia ser através do uso de um fluxo de potência convencional, onde repetidas simulações considerariam aumentos graduais de carga/geração de uma forma pré-definida. Entretanto, além do inconveniente de haver necessidade de intervenções manuais no processo, também haveria dificuldades em função da matriz Jacobiana tornar-se singular no ponto crítico, causando problemas de convergência nas simulações.

Utilizando-se uma classe especial de fluxos de potência, denominados fluxos de potência através do método da continuação, tais inconvenientes são evitados, realizando-se uma reformulação das equações de tal forma que a matriz Jacobiana permanece bem-condicionada para todas as condições de carga, permitindo obter-se soluções para o ponto crítico e até mesmo para pontos correspondentes a parte inferior da curva P-V.

O método da continuação é aplicado a qualquer classe de sistemas não-lineares para detectar um ponto de bifurcação. Tal teoria, entretanto, foge ao escopo deste trabalho.

3.2.1 Princípio Básico

O método da continuação tem sido usado por vários pesquisadores para traçar as curvas de soluções de fluxo de potência devidas a variações de carga e geração [26, 27, 28]. O princípio geral desse método é, baseado na informação presente, e em alguns casos também em uma informação passada, prever um ponto de possível solução para uma dada variação em um parâmetro e, usando esse valor previsto, realizar iterações até ser obtida uma solução real na curva de soluções. Pode-se caracterizar os seguintes elementos básicos utilizados nesse método:

- Previsor
- Controle do tamanho do passo
- Parametrização
- Corretor

Apesar desses elementos serem tomados como básicos, alguns aspectos específicos diferenciam as implementações do método da continuação propostas pelos pesquisadores nas análises de colapso de tensão. A seguir serão descritos esses elementos básicos, tomando por base a implementação proposta em [26], que é utilizada no programa PFLOW.

3.2.2 Formulação Matemática

O método da continuação permite traçar os pontos de equilíbrio a medida que um parâmetro varia no sistema. Deste modo, o modelo de fluxo de potência pode ser representado por:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (3.1)$$

onde λ é o parâmetro que conduz o sistema de um ponto de equilíbrio para outro, usualmente um fator aplicado à carga total, e x representa as variáveis de estado, ou seja, módulo e ângulo das tensões nodais.

3.2.3 Previsor, Controle do Tamanho do Passo e Parametrização

Na fase do previsor, uma aproximação linear é usada para estimar a próxima solução para uma dada variação no parâmetro.

Um meio de calcular a direção do vetor Δx em um ponto de equilíbrio conhecido (x^i, λ^i) na curva de soluções é determinar o vetor tangente naquele ponto. Então, derivando-se a Equação 3.1 em relação a λ obtém-se a seguinte equação linear:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|^i \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|^i + \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|^i = 0 \quad (3.2)$$

ou

$$\left. \frac{dx}{d\lambda} \right|^i = - \left(\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|^i \right)^{-1} \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|^i \quad (3.3)$$

onde $\frac{dx}{d\lambda}$ é o vetor tangente e $\frac{\partial f}{\partial x}$ é o Jacobiano do fluxo de carga.

Destaca-se que um elemento importante para a eficiência computacional do método da continuação é o controle do tamanho do passo de variação do parâmetro. A escolha de um passo constante não é conveniente pois assim como em algumas regiões a curva de solução apresenta pequena curvatura, onde é adequado um tamanho de passo relativamente grande para diminuir o esforço computacional, em outras regiões de maior curvatura passos de menor tamanho são mais apropriados. Portanto, para a eficiência da implementação do método da continuação deve-se ter um tamanho de passo variável.

Assim sendo, o tamanho do passo pode ser calculado a partir de uma normalização do vetor tangente, isto é:

$$\Delta \lambda^i = \frac{k}{\left\| \frac{dx}{d\lambda} \right\|^i} \quad (3.4)$$

sendo k uma constante. A referência [26] relata bons resultados para $k = 1$.

A Equação 3.4 resulta na redução do tamanho do passo a medida que o sistema aproxima-se do ponto crítico, haja vista que a magnitude do vetor tangente aumenta quando o sistema se aproxima desse ponto.

Uma vez definida a variação do parâmetro, a partir da Equação 3.4, a direção desejada para o vetor das variáveis de estado será dada por:

$$\Delta x^i = \Delta \lambda^i \frac{dx}{d\lambda} \Big|_i \quad (3.5)$$

E o ponto estimado como próxima solução será:

$$(\bar{x}^{i+1}, \bar{\lambda}^{i+1}) = (x^i + \Delta x^i, \lambda^i + \Delta \lambda^i) \quad (3.6)$$

Na medida em que o sistema se aproxima do ponto de colapso de tensão, a matriz Jacobiana do fluxo de potência torna-se mal-condicionada. Em um programa de fluxo

de carga convencional essa dificuldade numérica pode causar divergência no processo iterativo. Também haveria problemas no cálculo do vetor tangente, haja vista que o mesmo requer a inversão da matriz Jacobiana para sua determinação (Equação 3.3). Essa dificuldade pode ser superada através da parametrização local, que é feita escolhendo-se como parâmetro a variável de estado que apresentar maior variação relativa no último ponto calculado, isto é:

$$p \leftarrow \max \left\{ \left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right|^i, \left| \frac{\Delta x_2}{x_2} \right|^i, \dots, \left| \frac{\Delta x_n}{x_n} \right|^i, \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right|^i \right\} \quad (3.7)$$

Deste modo, próximo ao ponto crítico o parâmetro inicial λ permutará com a variável x_i de maior taxa de variação, de modo que λ tornar-se-á parte das variáveis das equações, enquanto x_i passará a ser o novo parâmetro. Da mesma forma, após mais alguns passos do método λ voltará a ser parâmetro.

Vale ressaltar que em [26] os autores relatam que a experiência com o método tem mostrado que em todas as aplicações práticas, independente do tamanho e complexidade do sistema, não tem havido necessidade de parametrização local quando o controle do tamanho do passo é utilizado, em função do Jacobiano do sistema somente tornar-se singular bastante próximo do ponto crítico.

É importante esclarecer ainda dois aspectos adicionais:

Um deles diz respeito a obtenção do ponto inicial do processo da continuação ($\lambda = 0$), o qual é conseguido a partir da solução de um caso base, usando-se uma técnica convencional de solução de fluxo de potência.

O outro aspecto refere-se a passagem pelo ponto crítico, após a qual o sinal de $\Delta \lambda$ deve ser invertido para a obtenção dos pontos inferiores da curva P-V. Isso pode ser detectado pelo sinal do determinante do fluxo de carga, enquanto o fator de carga for o parâmetro, ou pelo próprio cálculo de $\Delta \lambda$, quando uma das variáveis x_i for o parâmetro.

3.2.4 Corretor

Após ser estimada uma nova solução $(x^i + \Delta x^i, \lambda^i + \Delta \lambda^i)$, a próxima etapa é corrigir essa solução prevista para obter-se o novo ponto de equilíbrio (x^{i+1}, λ^{i+1}) na curva de soluções. Matematicamente, essa etapa corresponde a solução simultânea das equações originais sujeitas a restrição de que a nova solução seja um plano perpendicular a direção prevista, isto é:

$$\begin{aligned} f(x, \lambda) &= 0 \\ (\Delta x^i)^T [x - (x^i + \Delta x^i)] + \Delta \lambda^i [\lambda - (\lambda^i + \Delta \lambda^i)] &= 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Em princípio, qualquer procedimento para solução de um sistema de equações algébricas não-lineares pode ser empregado no passo corretor. O ponto de operação $(x^i + \Delta x^i, \lambda^i + \Delta \lambda^i)$, determinado no passo previsor, é usado como estimativa inicial.

3.2.5 Síntese do Processo

A Figura 3.1 ilustra o significado dos passos previsor e corretor, cuja descrição matemática foi realizada. Considerando-se um determinado ponto de operação (x^i, λ^i) conhecido, pode-se estimar no passo previsor um novo ponto $(x^i + \Delta x^i, \lambda^i + \Delta \lambda^i)$. Entretanto esse ponto não é solução de $f(x, \lambda) = 0$, a qual será determinada no passo corretor e corresponderá ao ponto (x^{i+1}, λ^{i+1}) .

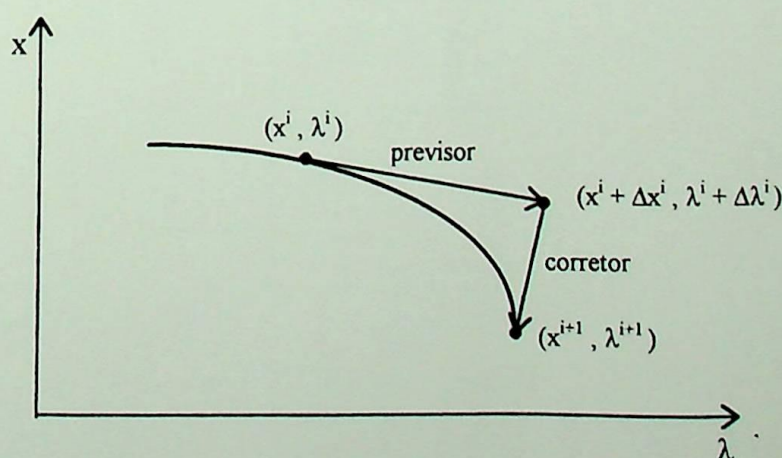


Figura 3.1 Processo do método da continuação

O resultado de repetidas execuções dos passos previsor e corretor é um conjunto de pontos que formam a curva de soluções da rede elétrica, onde a margem de carga será dada pela quantidade de potência ativa/reactiva que ao ser adicionada à carga inicial fará com que o sistema atinja o ponto crítico ("nariz" da curva P-V).

A Figura 3.2 proporciona uma síntese do processo de fluxo de potência através do método da continuação, em forma de fluxograma.

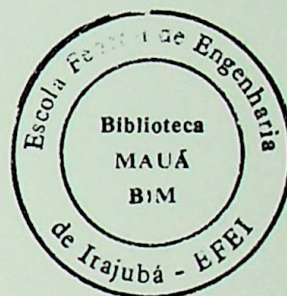
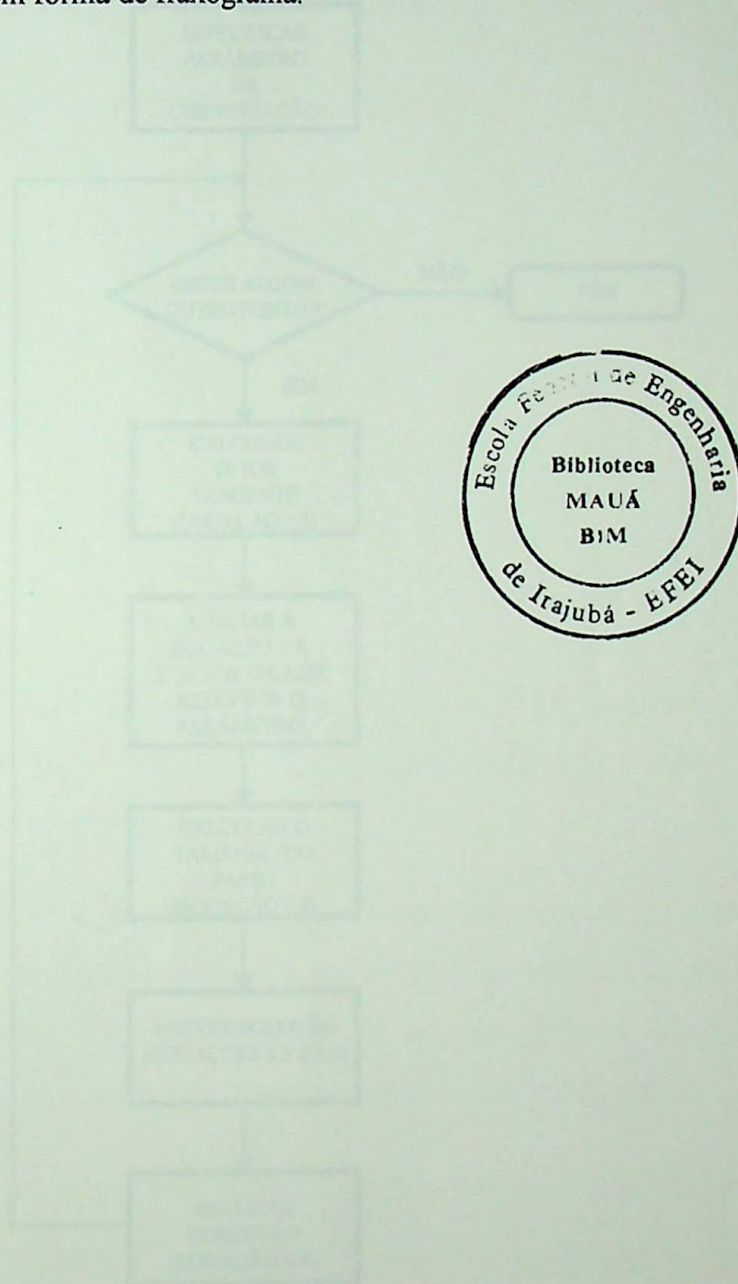


Figura 3.2 Fluxograma do fluxo de potência através do método da continuação.

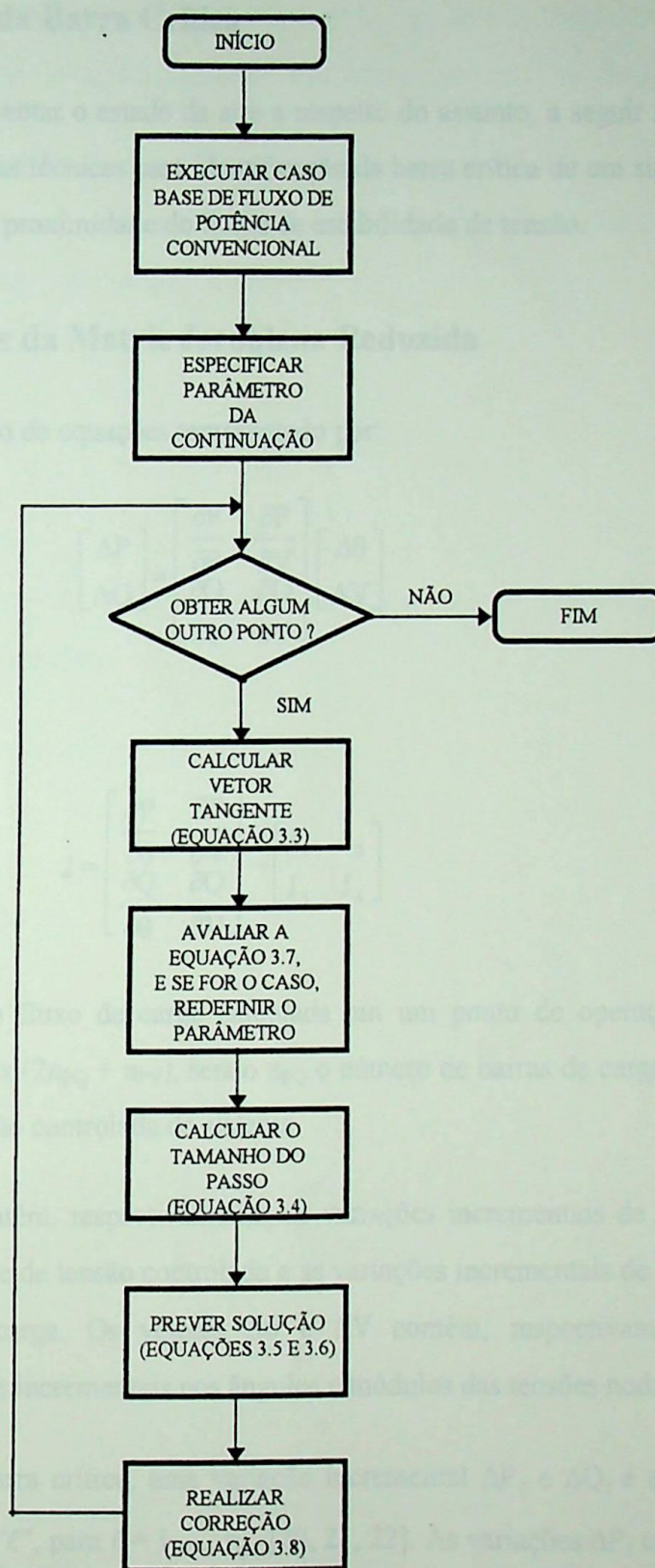


Figura 3.2 Um fluxograma do fluxo de potência através do método da continuação

3.3 Identificação da Barra Crítica

Com o objetivo de apresentar o estado da arte a respeito do assunto, a seguir será feita uma descrição de algumas técnicas para identificação da barra crítica de um sistema, as quais também indicam a proximidade do limite de estabilidade de tensão.

3.3.1 Determinante da Matriz Jacobiana Reduzida

Seja o sistema linearizado de equações representado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

onde

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

é a matriz Jacobiana do fluxo de carga calculada em um ponto de operação, cuja dimensão é $(2n_{PQ} + n_{PV}) \times (2n_{PQ} + n_{PV})$, sendo n_{PQ} o número de barras de carga e n_{PV} o número de barras de tensão controlada do sistema.

Os vetores ΔP e ΔQ contêm, respectivamente, as variações incrementais de potência ativa das barras de carga e de tensão controlada e as variações incrementais de potência reativa das barras de carga. Os vetores $\Delta \theta$ e ΔV contêm, respectivamente, as correspondentes variações incrementais nos ângulos e módulos das tensões nodais.

A fim de identificar a barra crítica, uma variação incremental ΔP_ℓ e ΔQ_ℓ é assumida para cada barra de carga " ℓ ", para $\ell = 1, \dots, n_{pq}$ [20, 21, 22]. As variações ΔP_ℓ e ΔQ_ℓ são feitas para cada barra de carga individualmente, considerando as demais barras de carga sem variação de carga. A variação de carga ativa, incluindo as perdas ativas, são consideradas absorvidas pela barra "swing" e as variações de carga reativa são absorvidas pelas barras de tensão controlada e pela própria "swing". É importante

lembrar que as variações incrementais de potência ativa e reativa da barra “swing” e de potência reativa das barras de tensão controlada não fazem parte da Equação 3.9.

Assim sendo, considerando-se as variações ΔP_t e ΔQ_t e reordenando a matriz Jacobiana de modo que as equações de interesse sejam as últimas, o sistema linearizado de equações do fluxo de carga pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \theta_t \\ \Delta V_t \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

onde as matrizes A, B, C e D são resultantes de uma partição da matriz Jacobiana e possuem as seguintes dimensões:

$$A: (2n_{PQ} + n_{PV} - 2) \times (2n_{PQ} + n_{PV} - 2)$$

$$B: (2n_{PQ} + n_{PV} - 2) \times 2$$

$$C: 2 \times (2n_{PQ} + n_{PV} - 2)$$

$$D: 2 \times 2$$

A Equação 3.11 pode ainda ser reduzida a:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_t \\ \Delta Q_t \end{bmatrix} = [D_t'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_t \\ \Delta V_t \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

onde

$$D_t' = D - C A^{-1} B \quad (3.13)$$

De acordo com a fórmula de Schur [36], apresentada no Apêndice III, o determinante da matriz Jacobiana da Equação 3.11 pode ser dado por:

$$\det(J) = \det(D_t') \det(A) \quad (3.14)$$

Como a condição crítica para a estabilidade de tensão é $\det(J) = 0$, e assumindo que a matriz A é não-singular, pode-se dizer que o determinante de D_i' torna-se nulo no ponto de colapso.

A matriz D_i' , de dimensão 2×2 , relaciona as potências ativa e reativa da barra de interesse com o ângulo e módulo de sua tensão, considerando implicitamente todas as outras equações da matriz Jacobiana do fluxo de carga.

O módulo e o sinal do determinante da matriz D_i' de uma certa barra traduz a sensibilidade do módulo e ângulo da tensão em relação à variação das injeções de potência ativa e reativa naquela barra.

Se o determinante da matriz D_i' for positivo, as ações de controle da tensão naquela barra tem o efeito esperado, enquanto que se esse determinante for negativo o efeito das ações de controle é oposto ao esperado. Se o determinante de D_i' for nulo ou muito próximo de zero, a sensibilidade é infinita ou muito grande, significando que pequenas variações de carga implicam infinita ou grande variação no módulo e ângulo da tensão.

Assim sendo, valores positivos do determinante de D_i' indicam que o sistema está em uma condição de operação estável e é desejável que ele seja o maior possível pois valores próximos de zero indicam que foi alcançada a máxima capacidade de transmissão de potência ativa/reativa para a barra em análise, considerando-se o sistema como um todo, e a barra associada ao menor valor desse determinante é a barra crítica do sistema. Valores negativos do determinante de D_i' indicam que o sistema está em uma condição instável de operação.

As referências [20, 21, 22] mostram que enquanto o valor do determinante da matriz Jacobiana pode variar de um valor altamente positivo para um valor altamente negativo, passando rapidamente por zero, o determinante de D_i' varia lentamente com a variação de carga, sendo por isso mais adequado para a análise do problema. Isso pode ser explicado pela possibilidade de uma pequena área de um grande sistema apresentar problema de estabilidade de tensão, ou seja, $\det(D_i') \cong 0$, apesar de que o sistema como um todo possa operar com folga, isto é, $\det(J) \gg 0$.

Assim sendo, enquanto o determinante da matriz Jacobiana (J) fornece informação tão somente sobre a condição de estabilidade ou não, o determinante da matriz Jacobiana reduzida (D_r) fornece, além dessa informação, a identificação da barra crítica.

Deve-se ressaltar que o fato de considerar-se toda variação de potência ativa absorvida pela barra “swing”, o que não é real, faz com que os resultados sejam dependentes da escolha dessa barra.

3.3.2 Decomposição em Valores Singulares

Valores singulares têm sido empregados em sistemas de potência em função da decomposição ortonormal das matrizes Jacobianas.

Por definição [37], valores singulares de uma matriz A qualquer são números σ_i , onde $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$, sendo λ_i , para i variando de 1 até n , os autovalores (todos não negativos) da matriz quadrada $A^H A$, onde n é a ordem dessa matriz. No caso particular em que a matriz A é real esses autovalores correspondem à matriz $A^T A$.

Considerando-se, então, o caso em que A é uma matriz quadrada, de dimensão $n \times n$ e real, a sua decomposição em valores singulares é expressa como:

$$A = U \Sigma V^T = \sum_{i=1}^n u_i \sigma_i v_i^T \quad (3.15)$$

onde U e V são matrizes ortonormais de ordem $n \times n$, u_i e v_i são vetores singulares correspondentes à i -ésima coluna de U e V , respectivamente, e Σ é uma matriz diagonal com os valores singulares de A , tal que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n$, com $\sigma_i \geq 0$ para todo i .

A referência [17] aplica a decomposição em valores singulares à matriz Jacobiana do fluxo de carga, de forma que tem-se:

$$J = U \Sigma V^T \quad (3.16)$$

e

$$J^{-1} = V \Sigma^{-1} U^T \quad (3.17)$$

Portanto, a Equação 3.9 pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = V\Sigma^{-1}U^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n v_i \sigma_i^{-1} u_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

A aplicação de valores singulares à análise de colapso de tensão visa monitorar o menor valor singular até o ponto em que ele se torna nulo, ou seja, ponto em que a matriz Jacobiana é singular. Deste modo, perto do limite de estabilidade de tensão σ_n aproxima-se de zero e a Equação 3.18 pode ser considerada como:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \cong v_n \sigma_n^{-1} u_n^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Portanto, o inverso do mínimo valor singular, σ_n^{-1} , será, sob o ponto de vista de um distúrbio, o indicador da maior variação das variáveis de estado do sistema de potência.

Assumindo-se

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = u_n \quad (3.20)$$

então, a partir da Equação 3.19, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \cong \sigma_n^{-1} v_n \quad (3.21)$$

Assim sendo os autores interpretam que [17]:

- O menor valor singular, σ_n , é um indicador da proximidade do limite de estabilidade de regime permanente.
- O vetor singular direito, v_n , correspondente à σ_n , indica a sensibilidade dos módulos e ângulos das tensões (barras críticas).
- O vetor singular esquerdo, u_n , correspondente à σ_n , indica a direção mais sensível para variações de injeções de potência ativa e reativa.

A referência [17] aplica também a decomposição em valores singulares à matriz J_{QV} , que relaciona diretamente potência reativa com módulo da tensão e é obtida a partir de uma redução da matriz Jacobiana do fluxo de carga ao fazer-se $\Delta P = 0$ na Equação 3.9, ou seja:

$$\Delta V = J_{QV}^{-1} \Delta Q \quad (3.22)$$

onde

$$J_{QV} = J_4 - J_3 J_1^{-1} J_2 \quad (3.23)$$

Os resultados de simulações apresentadas em [17] mostram que durante um processo de aumento de carga do sistema, levando-o do ponto de operação inicial até o limite de estabilidade de tensão, o comportamento do mínimo valor singular da matriz Jacobiana reduzida J_{QV} apresenta-se mais adequado para análise de estabilidade de tensão do que quando se utiliza o mínimo valor singular para a matriz Jacobiana completa J , em função de no primeiro caso o mínimo valor singular ser mais sensível à variação de carregamento. Os autores sugerem, então, o uso do mínimo valor singular da matriz Jacobiana reduzida J_{QV} como índice de estabilidade de tensão.

A referência [17] ressalta também o aspecto de que com o aumento da dimensão da matriz em estudo o maior valor singular aumenta e o menor valor singular diminui. No caso de interesse isso ocorrerá toda vez que uma barra de tensão controlada atingir seu limite de potência reativa, tornando-se uma barra de carga.

3.3.3 Decomposição em Autovalores

Seja uma matriz quadrada A , real, de dimensão $n \times n$. A sua decomposição em autovalores é expressa como:

$$A = X \Lambda Y^T = \sum_{i=1}^n x_i \lambda_i y_i^T \quad (3.24)$$

onde X e Y representam as matrizes dos autovetores à direita x_i e dos autovetores à esquerda y_i , respectivamente, e Λ é uma matriz diagonal com os autovalores λ_i da matriz A .

A referência [18] aplica a decomposição em autovalores à matriz Jacobiana reduzida J_{QV} , definida na Equação 3.23, de forma que:

$$J_{QV} = X\Lambda Y^T \quad (3.25)$$

e

$$J_{QV}^{-1} = X\Lambda^{-1}Y^T \quad (3.26)$$

Das Equações 3.22 e 3.26 tem-se:

$$\Delta V = X\Lambda^{-1}Y^T \Delta Q = \sum_{i=1}^n x_i \lambda_i^{-1} y_i^T \Delta Q \quad (3.27)$$

Cada autovalor λ_i e os correspondentes autovetores à direita e à esquerda, x_i e y_i , definem o i -ésimo modo da resposta Q-V.

Como $X^{-1} = Y^T$, a equação 3.27 pode ser escrita como:

$$Y^T \Delta V = \Lambda^{-1} Y^T \Delta Q \quad (3.28)$$

ou

$$v = \Lambda^{-1} q \quad (3.29)$$

onde

$v = Y^T \Delta V$ é o vetor modal de variações de tensão

$q = Y^T \Delta Q$ é o vetor modal de variações de potência reativa

A Equação 3.29 representa um conjunto de equações desacopladas de primeira ordem e então para o i -ésimo modo tem-se:

$$v_i = \frac{1}{\lambda_i} q_i \quad (3.30)$$

Considerando-se para fins práticos a matriz Jacobiana reduzida J_{QV} como uma matriz simétrica [18, 19], os seus autovalores podem ser considerados reais e quando todos forem positivos indicam que o sistema é estável e, portanto, todos os modos de variação de tensão estão nos mesmos sentidos de seus respectivos modos de variação de potência reativa. Portanto, o valor de cada modo de variação de tensão é igual ao valor de cada modo de variação de potência reativa amplificado do inverso do autovalor associado ao modo. A medida que o sistema aproxima-se do ponto crítico de estabilidade de tensão os autovalores da matriz J_{QV} tornam-se menores, com um deles se anulando nesse ponto. Logo, quando $\lambda_i = 0$ qualquer variação no i -ésimo modo de variação de potência reativa causa uma variação infinita no i -ésimo modo de variação de tensão e a matriz J_{QV} é singular. A presença de pelo menos um autovalor negativo indica uma condição de instabilidade de tensão, ou seja, pelo menos um modo de variação de tensão está em sentido oposto ao de seu respectivo modo de variação de potência reativa.

Apesar do cálculo dos autovalores próximos de zero ou negativos darem um indicativo da proximidade da instabilidade de tensão ou mesmo da condição de instabilidade, eles não possibilitam, por si só, a localização da área crítica. Para esse fim há necessidade de serem utilizados os autovetores à esquerda e à direita associados a cada autovalor, que definem os modos de oscilação, a fim de calcular o fator de participação de cada barra para cada modo de oscilação.

Assim sendo, o fator de participação da barra k para o modo i é definido como,

$$p_{ki} = x_{ki} y_{ik} \quad (3.31)$$

A localização das barras críticas se dá pela identificação dos maiores fatores de participação para cada um dos autovalores próximos de zero ou negativos.

Desde que a matriz Jacobiana é genérica, ou seja, ela pode ser a matriz representativa de qualquer conjunto de equações linearizadas que seja de interesse para análise, a referência [18] também aborda brevemente sobre a inclusão de alguns modelos de

interesse na matriz Jacobiana, tais como, limites nas correntes de campo e de armadura e limites de subexcitação das unidades geradoras, dependência da carga com a tensão, utilização de motores de indução na composição da carga e representação de compensadores estáticos.

3.3.4 Vetor Tangente

Considerando-se o modelo de fluxo de potência dado pela Equação 3.1, o vetor tangente, que mostra como as variáveis de estado se modificam com o carregamento de um sistema, pode ser calculado através da Equação 3.3. Essa equação, apresentada de forma genérica, pode ser melhor detalhada, conforme a descrição a seguir.

Seja o sistema linearizado de equações representado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_\ell \\ \Delta Q_\ell \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_\ell \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

onde J é a matriz Jacobiana do fluxo de carga, os vetores ΔP_g e ΔP_ℓ contêm, respectivamente, as variações incrementais de potência ativa das barras de tensão controlada e de carga, o vetor ΔQ_ℓ contêm as variações incrementais de potência reativa das barras de carga e os vetores $\Delta \theta_g$, $\Delta \theta_\ell$ e ΔV_ℓ contêm, respectivamente, as correspondentes variações incrementais nos ângulos e módulos das tensões nodais.

A partir da Equação 3.32 tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_\ell \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_\ell \\ \Delta Q_\ell \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

O aumento de carga é obtido da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} P_{\ell i} &= P_{\ell i0} (1 + \lambda) \\ Q_{\ell i} &= Q_{\ell i0} (1 + \lambda) \end{aligned} \quad (3.34)$$

onde $P_{\ell io}$ e $Q_{\ell io}$ são as cargas ativa e reativa iniciais na barra "i" e $P_{\ell i}$ e $Q_{\ell i}$ são as cargas ativa e reativa na barra "i" após a variação do parâmetro λ .

Da mesma forma, o aumento de geração de potência ativa pode ser dado por:

$$P_{gi} = P_{gio} (1 + \lambda) \quad (3.35)$$

onde P_{gio} é a geração de potência ativa inicial na barra "i" e P_{gi} é a geração de potência ativa na barra "i" após a variação do parâmetro λ .

Linearizando-se as Equações 3.34 e 3.35 obtém-se as seguintes variações incrementais de potência:

$$\Delta P_{\ell i} = P_{\ell io} \Delta \lambda$$

$$\Delta Q_{\ell i} = Q_{\ell io} \Delta \lambda \quad (3.36)$$

$$\Delta P_{gi} = P_{gio} \Delta \lambda$$

Assim sendo, a Equação 3.33 torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_\ell \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_{go} \\ P_{\ell o} \\ Q_{\ell o} \end{bmatrix} \Delta \lambda \quad (3.37)$$

onde os vetores P_{go} , $P_{\ell o}$ e $Q_{\ell o}$ contêm, respectivamente, as gerações de potência ativa, as cargas ativas e as cargas reativas iniciais de todas as barras.

O vetor tangente é então obtido por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta_g}{\Delta \lambda} \\ \frac{\Delta \theta_\ell}{\Delta \lambda} \\ \frac{\Delta V_\ell}{\Delta \lambda} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_{go} \\ P_{\ell o} \\ Q_{\ell o} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$



Pode-se observar que o vetor tangente é obtido pelo produto da inversa da matriz Jacobiana pelo vetor de carga/geração inicial.

Tendo-se determinado o vetor tangente, a maior entrada nesse vetor identifica a variável que mais se modifica para uma variação de carga e a barra à qual essa variável estiver relacionada é, conseqüentemente, a barra crítica.

Tal como apresentado nas técnicas de decomposição em valores singulares e de decomposição em autovalores, a técnica do vetor tangente também pode ser aplicada à matriz Jacobiana reduzida J_{QV} , definida na Equação 3.23. Nesse caso, de maneira semelhante à usada para o caso do Jacobiano completo J , o vetor tangente pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta V_t}{\Delta \lambda} \end{bmatrix} = [J_{QV}]^{-1} [Q_{t0}] \quad (3.39)$$

A referência [10] mostra que o vetor tangente apresenta-se bem comportado tanto se calculado para o Jacobiano completo J , como ao se calcular para o Jacobiano reduzido J_{QV} .

3.4 Metodologia Utilizada

A identificação da barra crítica, por qualquer das técnicas apresentadas, pode sofrer alterações entre o ponto de operação de um sistema até o ponto de colapso, dependendo do ponto analisado, em função das não-linearidades envolvidas.

A referência [19] faz uma comparação entre as técnicas descritas nas seções 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3. Os testes realizados consistiam em variar a carga do sistema IEEE-300 barras até que o ponto de colapso de tensão fosse obtido. Para cada ponto de operação eram identificados o mínimo valor singular e o mínimo autovalor absoluto da matriz Jacobiana do fluxo de carga J e da matriz Jacobiana reduzida J_{QV} , bem como o determinante da matriz Jacobiana reduzida D_t' . Dessa forma, foram obtidos gráficos para cada um desses índices em função do aumento de carga, e são reproduzidos a seguir, para efeito de comparação, os casos considerando os limites de potência reativa dos geradores.

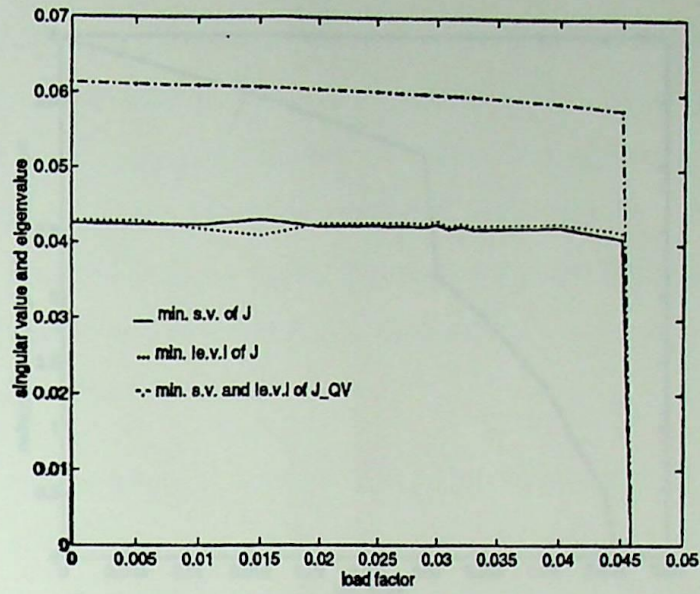


Figura 3.3 Mínimo valor singular e mínimo autovalor absoluto

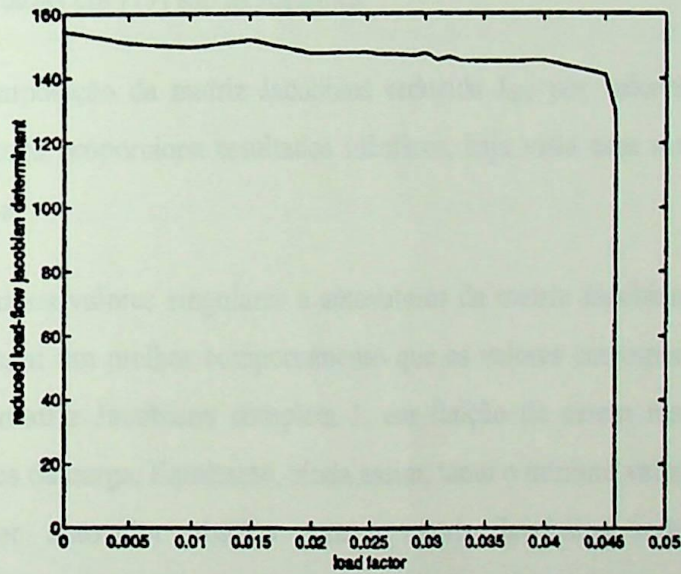


Figura 3.4 Determinante do Jacobiano reduzido D'_l avaliado para uma barra não-crítica (192)

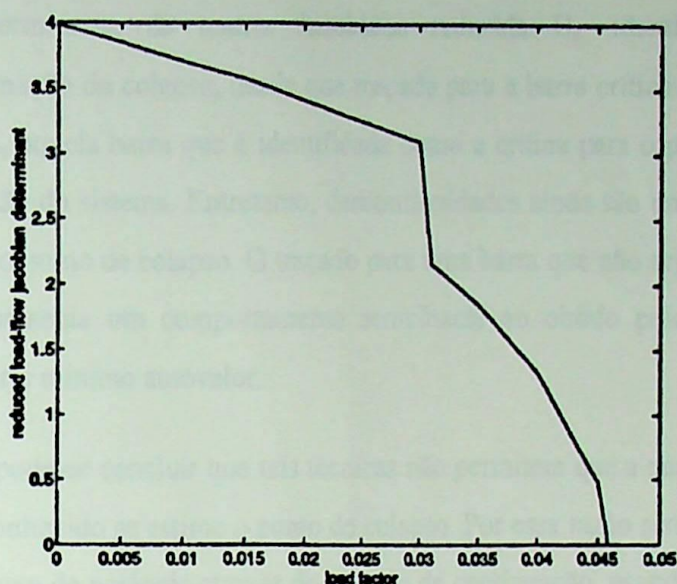
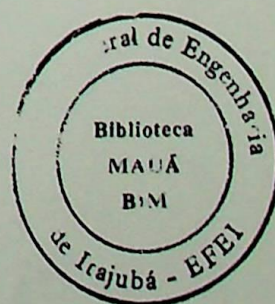


Figura 3.5 Determinante do Jacobiano reduzido D'_i avaliado para a barra crítica (526)

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5, as principais conclusões relatadas em [19] são as seguintes:

- A decomposição da matriz Jacobiana reduzida J_{QV} por valores singulares ou autovalores proporciona resultados idênticos, haja vista essa matriz ser quase-simétrica.
- Os mínimos valores singulares e autovalores da matriz Jacobiana reduzida J_{QV} apresentam um melhor comportamento que os valores correspondentes obtidos para a matriz Jacobiana completa J , em função de serem mais sensíveis às variações de carga. Entretanto, ainda assim, tanto o mínimo valor singular como o menor autovalor obtidos para a matriz Jacobiana reduzida J_{QV} são inconvenientes como índices de proximidade do colapso de tensão em função de apresentarem pequena variação até o ponto imediatamente antes do colapso, reduzindo subitamente ao atingi-lo, dando assim uma falsa segurança.



- O determinante da matriz Jacobiana reduzida D_r identifica melhor a aproximação do colapso, desde que traçado para a barra crítica real do sistema, ou seja, aquela barra que é identificada como a crítica para o ponto de colapso de tensão do sistema. Entretanto, descontinuidades ainda são um obstáculo para prever o ponto de colapso. O traçado para uma barra que não seja a barra crítica real apresenta um comportamento semelhante ao obtido pelo mínimo valor singular e mínimo autovalor.

Assim sendo, pode-se concluir que tais técnicas não permitem que a partir de um ponto de operação conhecido se estime o ponto de colapso. Por essa razão será utilizado neste trabalho um fluxo de potência através do método da continuação, usando-se o programa PFLOW [26], por meio do qual serão obtidas as margens de carga.

Com relação ao vetor tangente, a referência [38] mostra que o mesmo converge para o autovetor à direita no ponto de colapso e a referência [23] mostra que a maior entrada no autovetor à direita associado ao autovalor nulo identifica a barra crítica real do sistema. Contudo, para outros pontos de operação que não sejam bastante próximos ao de colapso, a monitoração da maior entrada no autovetor à direita associado ao menor autovalor não proporciona informação a respeito da identificação da barra crítica real do sistema. Por outro lado o vetor tangente pode identificar a barra crítica real para outros pontos de operação que não sejam tão próximos ao de colapso.

Isso pode ser observado na Figura 3.6, onde a linha cheia representa o inverso da maior entrada no vetor tangente e a linha pontilhada o inverso da componente associada à barra 526, previamente identificada como a barra crítica no ponto de colapso, traçadas como função do parâmetro de aumento de carga λ . Observa-se que ambas as curvas resultam em uma só com o sistema ainda longe do ponto de colapso, indicando que a barra 526 torna-se crítica naquele ponto. Portanto, se fosse utilizado um fluxo de carga convencional, somente o vetor tangente seria efetivo nesse caso.

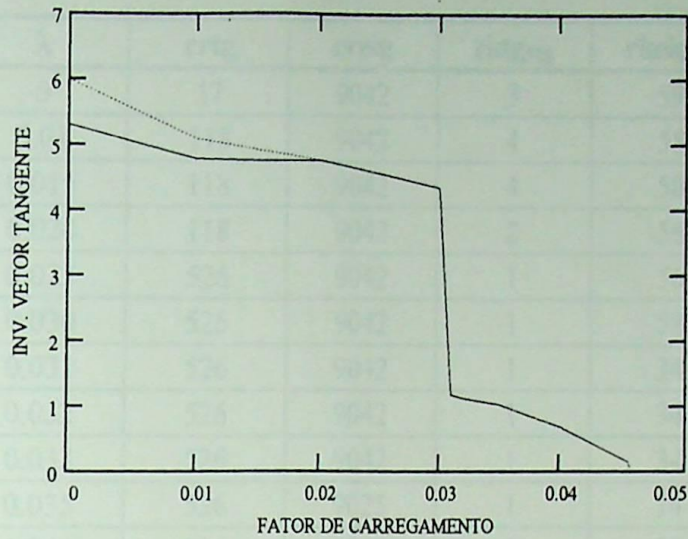


Figura 3.6 Componentes do vetor tangente

Esses valores foram obtidos através de uma rotina desenvolvida em MATLAB [39] para determinação do vetor tangente, usando-se as matrizes Jacobianas reduzidas J_{QV} , também obtidas através dessa rotina, tomando por base as matrizes Jacobianas do fluxo de carga fornecidas pelo programa PFLOW [26] para diversos pontos de operação. As simulações foram realizadas para o sistema IEEE-300 barras*, com os limites de potência reativa dos geradores considerados.

Também pode ser observado na Figura 3.6 que o vetor tangente apresenta comportamento similar àquele obtido para o determinante da matriz Jacobiana reduzida D_t' avaliado para a barra crítica, apresentado na Figura 3.5.

Uma comparação do comportamento do vetor tangente com o comportamento do autovetor à direita associado ao menor autovalor, durante o processo de aumento de carga no sistema IEEE-300 barras, é apresentado na Tabela 3.1. As colunas “crtg” e “creig” indicam as barras críticas para cada ponto de operação, calculadas, respectivamente, pelo vetor tangente e autovetor à direita e “rktg₅₂₆” e “rkeig₅₂₆” indicam o “rank” da barra crítica real em cada ponto de operação, calculados pelo vetor tangente e autovetor à direita, respectivamente.

* Dados disponíveis por ftp “anonymous”, no endereço wahoo.ee.washington.edu.

λ	crtg	creig	rktg ₅₂₆	rkeig ₅₂₆
0	17	9042	3	59
0.01	118	9042	4	58
0.015	118	9042	4	58
0.020	118	9042	2	56
0.025	526	9042	1	56
0.030	526	9042	1	58
0.031	526	9042	1	34
0.032	526	9042	1	34
0.033	526	9042	1	34
0.035	526	9025	1	14
0.040	526	9042	1	28
0.0455	526	9042	1	16
0.04576	526	526	1	1

Tabela 3.1 Identificação da barra crítica

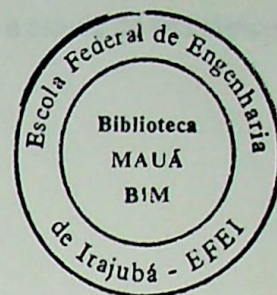
Fica claro, da Tabela 3.1, que o vetor tangente identifica corretamente a barra crítica real para outros pontos que não sejam o ponto crítico. Portanto, embora o vetor tangente convirja para o autovetor à direita no ponto crítico, eles proporcionam diferentes informações durante o aumento no carregamento do sistema.

Assim sendo, verifica-se que a técnica do vetor tangente apresenta-se como a mais adequada para determinação da barra crítica, haja vista que o vetor tangente, além da determinação simples, ou seja, é obtido diretamente da Equação 3.39, proporciona também uma identificação precoce da barra crítica real.

Ressalta-se, contudo, que para a comparação efetuada identificou-se previamente qual era a barra crítica real e por isso foi mencionado que o vetor tangente identifica essa barra de forma precoce. Para uma condição qualquer em que não houvesse uma prévia identificação da barra crítica no ponto de colapso, não poderia ser afirmado com segurança qual o ponto em que o vetor tangente identifica a barra crítica real.

Capítulo 4

DETERMINAÇÃO DE AÇÕES DE CONTROLE



4.1 Introdução

Este capítulo propõe a determinação de ações de controle para prevenção do colapso de tensão. Tais ações baseiam-se no conhecimento da barra crítica do sistema e são testadas de duas formas:

- Inicialmente as ações de controle são tomadas sobre os geradores do sistema. Com esse objetivo é desenvolvida uma técnica que utiliza matrizes de sensibilidade obtidas em relação a barra crítica do sistema [10], a qual é determinada pelo vetor tangente, cujas vantagens já foram analisadas no capítulo anterior. Dessa forma, essas ações de controle são efetivadas através do aumento de geração de potência reativa nos geradores com maior grau de ligação com a barra crítica.
- Posteriormente são efetivadas ações de controle local, através da instalação de bancos de capacitores "shunt" na barra crítica. Esses mesmos bancos de capacitores são instalados em outras barras e os resultados são comparados. Adicionalmente, são apresentados os resultados de dois casos, onde foram utilizados compensador estático e capacitor série.

Essas ações de controle são testadas no sistema IEEE-300 barras, onde os efeitos dos limites de potência reativa dos geradores são considerados.

4.2 Determinação de Ações de Controle através de Geradores utilizando Matrizes de Sensibilidade

A análise estática da estabilidade de tensão requer basicamente o estudo de três tópicos:

- 1) Cálculo da margem de carga.
- 2) Identificação da barra crítica.
- 3) Determinação de ações de controle.

O primeiro tópico é determinado, neste trabalho, utilizando-se um fluxo de potência através do método da continuação (programa PFLOW) e o segundo por meio do vetor tangente, simulado através de uma rotina desenvolvida no programa MATLAB [39]. Ambas as técnicas foram descritas no capítulo anterior.

Neste capítulo, será focado o terceiro tópico. Tendo em vista que o colapso de tensão inicia-se localmente e propaga-se pela vizinhança, o conhecimento da barra crítica é útil para a determinação de ações de controle. Por ações de controle sobre geradores entende-se a determinação dos geradores cuja variação de potência reativa produza a melhor variação do nível de tensão nas barras de interesse. Tais ações serão aqui determinadas através de matrizes de sensibilidade calculadas em relação a barra crítica real do sistema.

Assim sendo, considera-se, inicialmente, o modelo linearizado resultante de todas as equações de fluxo de carga, exceto as de potência ativa e reativa da barra “swing”, conforme mostrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_g \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_g \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde “g” representa as barras de geração e “l” as barras de carga e as submatrizes A, B, C e D possuem dimensões $(n_{PQ} + n_{PV}) \times (n_{PQ} + n_{PV})$.

Como a análise de colapso de tensão está relacionada principalmente com a relação “módulo da tensão x potência reativa”, então uma matriz de sensibilidade pode ser obtida da Equação 4.1 considerando-se que o sistema não tenha variação de potência ativa, ou seja:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Q_g \\ \Delta Q_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_\ell \\ \Delta V_g \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Isso fornece as seguintes equações:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_\ell \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

e

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_g \\ \Delta Q_\ell \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_\ell \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Isolando-se $\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_\ell \end{bmatrix}$ na Equação 4.3 obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_\ell \end{bmatrix} = -[A]^{-1} [B] \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Da substituição da Equação 4.5 na Equação 4.4 resulta:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_g \\ \Delta Q_\ell \end{bmatrix} = [D - C A^{-1} B] \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} = [J_{red}] \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_\ell \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

onde a matriz Jacobiana reduzida J_{red} tem dimensão $(n_{PQ} + n_{PV}) \times (n_{PQ} + n_{PV})$.

Deste modo, a proposta deste trabalho é implementada da seguinte maneira: para cada barra de geração reordena-se o Jacobiano reduzido J_{red} , obtido na Equação 4.6, de tal forma que a linha e a coluna associadas à barra crítica sejam trocadas pelas últimas

linha e coluna desse Jacobiano. Da mesma forma, a linha e coluna de cada gerador são trocadas pelas penúltimas linha e coluna, obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_g \\ \Delta Q_\ell \\ \Delta Q_{gn} \\ \Delta Q_{lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA & BB \\ CC & DD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_\ell \\ \Delta V_{gn} \\ \Delta V_{lc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde as submatrizes AA, BB, CC e DD possuem as seguintes dimensões:

$$AA: (n_{PQ} + n_{PV} - 2) \times (n_{PQ} + n_{PV} - 2)$$

$$BB: (n_{PQ} + n_{PV} - 2) \times 2$$

$$CC: 2 \times (n_{PQ} + n_{PV} - 2)$$

$$DD: 2 \times 2$$

Para obter-se a relação entre a variação de tensão na barra crítica “lc” e a variação de potência reativa na barra de geração “gn”, assume-se que não haja variação de potência reativa nas demais barras, ou seja:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Q_{gn} \\ \Delta Q_{lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA & BB \\ CC & DD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_\ell \\ \Delta V_{gn} \\ \Delta V_{lc} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

De forma similar à utilizada para conseguir-se a Equação 4.6, a Equação 4.8 pode ser reduzida e a seguinte relação ser obtida:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{gn} \\ \Delta Q_{lc} \end{bmatrix} = [DD - CC AA^{-1} BB] \begin{bmatrix} \Delta V_{gn} \\ \Delta V_{lc} \end{bmatrix} = [J_{gnlc}] \begin{bmatrix} \Delta V_{gn} \\ \Delta V_{lc} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

onde a matriz J_{gnlc} tem dimensão 2×2 e pode ser calculada para cada gerador.

Portanto, da Equação 4.9 a relação entre ΔV_{lc} e cada ΔQ_{gn} é obtida e os geradores mais indicados a atuar são identificados.

Essa técnica foi implementada para simulação no programa MATLAB [39].

Deve-se ressaltar que o processo computacional acima não é um impedimento para o uso da técnica, haja vista que o lema da matriz inversa mostra-se efetivo para esse tipo de análise.

4.3 Resultados de Testes

Nesta seção, ações de controle sobre geradores e ações de controle local são testadas no sistema IEEE-300 barras. Esse sistema tem 69 barras de geração, 231 barras de carga e 411 transformadores e linhas de transmissão. Os testes são realizados com e sem limites de potência reativa dos geradores. Optou-se por modelar as cargas ativa e reativa como potência constante.

4.3.1 Ações de Controle através de Geradores

O método para determinação de ações de controle proposto na seção 4.2 é testado da seguinte maneira:

- 1) A partir de um ponto de operação inicial um fluxo de potência através do método da continuação é usado para determinar o ponto de colapso e a barra crítica real é identificada pelo vetor tangente. Nas análises efetuadas optou-se por considerar um aumento de carga uniforme em todo o sistema, ou seja, proporcional à demanda de cada barra de carga, com um correspondente incremento de potência ativa em todos os geradores, também proporcionalmente à geração de cada um.
- 2) Para o ponto de colapso determina-se os geradores mais fortemente conectados à barra crítica.
- 3) Aplica-se as ações de controle sobre geradores no ponto de operação inicial e calcula-se o novo ponto de colapso.

Para efeito de comparação, as ações de controle são também determinadas em relação a outras barras que não sejam a crítica real do sistema, ou seja, aquela que é identificada como barra crítica no ponto de colapso, e o novo ponto de colapso é calculado.

a) Não considerando os limites de potência reativa dos geradores

Neste caso, seguindo o procedimento proposto, tem-se:

- 1) O fluxo de potência através do método da continuação identifica a margem de carga como sendo $\lambda = 0.36908$ e a técnica do vetor tangente identifica a barra crítica real como a 192.
- 2) As dez barras de geração mais fortemente conectadas à barra crítica são determinadas a partir da Equação 4.9 como sendo as seguintes: 191, 221, 190, 241, 220, 76, 227, 222, 233 e 236.
- 3) Elevando-se o nível de tensão nessas dez barras a nova margem de carga é $\lambda = 0.39678$.

Esse resultado indica que uma maior margem de carga é obtida. A Figura 4.1 mostra as curvas P-V para a barra 192, para os casos com e sem ações de controle, onde pode-se observar, além de uma maior margem de carga, que o nível de tensão na barra 192 para o ponto de operação inicial é maior em função das ações de controle.

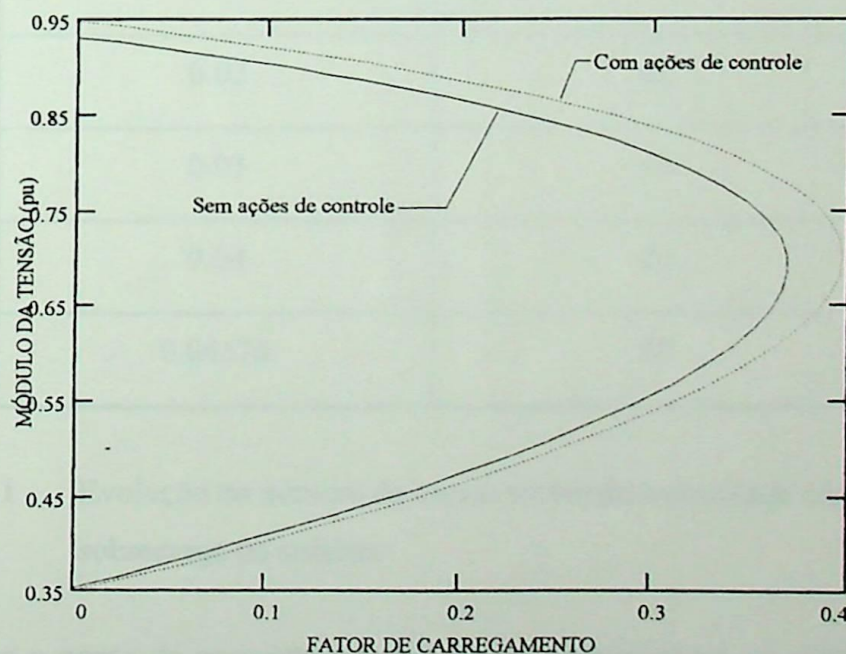


Figura 4.1 Curvas P-V da barra 192 - Casos sem limites

Se as ações de controle forem tomadas em relação a outra barra, como por exemplo a 118, identificada como a barra crítica para o ponto de operação inicial, a margem de carga obtida seria $\lambda = 0.36977$.

Nota-se que o resultado para a barra crítica real é mais efetivo.

b) Considerando os limites de potência reativa dos geradores

Deve-se observar que a consideração dos limites de potência reativa dos geradores pode mudar a estrutura da matriz Jacobiana de acordo com o carregamento do sistema. A Tabela 4.1 ilustra a evolução do número de barras de tensão controlada, ou seja, barras de geração que não atingiram seus limites de potência reativa, em função do aumento de carga no sistema.

Aumento de Carga (λ)	Número de Barras de Tensão Controlada
0.0	51
0.01	45
0.02	45
0.03	43
0.04	40
0.04576	37

Tabela 4.1 Evolução do número de barras de tensão controlada em função da sobrecarga no sistema

Portanto, para o ponto de operação em que forem determinadas as ações de controle, somente os geradores cujos limites de geração de potência reativa não forem atingidos serão considerados na técnica descrita na seção 4.2.

Seguindo-se o procedimento proposto, neste caso com limites, tem-se:

- 1) O fluxo de potência através do método da continuação identifica a margem de carga como sendo $\lambda = 0.04576$ e a técnica do vetor tangente identifica a barra crítica real como a 526.

Comparando-se esses resultados com aqueles obtidos para o caso sem limites observa-se dois aspectos importantes:

- A margem de carga é significativamente menor.
- A barra crítica é diferente, identificando, portanto, uma área crítica diferente.

A Figura 4.2 apresenta as curvas P-V para as barras 192 e 526 no caso de considerar-se os limites de potência reativa dos geradores. Observa-se, nesse caso, uma pequena variação do módulo da tensão da barra 192 quando comparada com aquela apresentada na Figura 4.1.

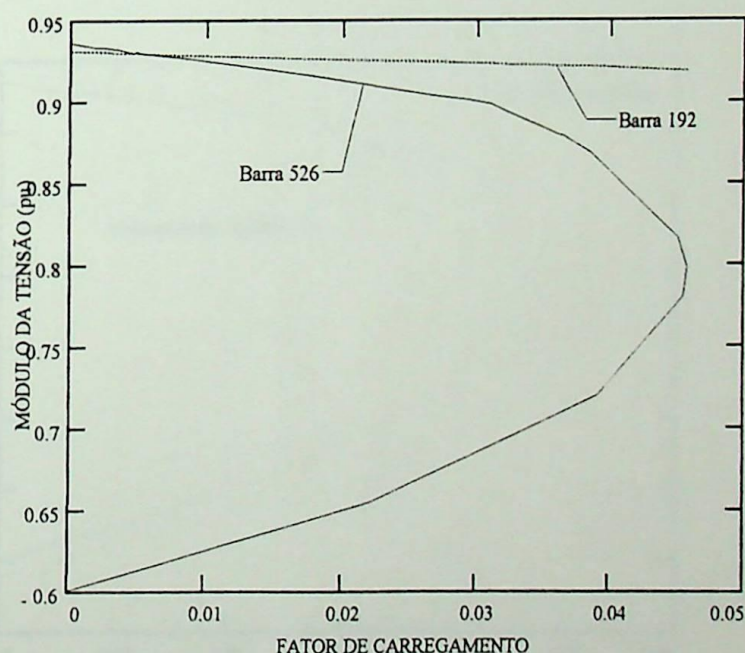


Figura 4.2 Curvas P-V para as barras 526 e 192 - Caso com limites

- 2) As dez barras de geração mais fortemente conectadas à barra crítica são determinadas a partir da Equação 4.9 como sendo as seguintes: 143, 190, 84, 7002, 198, 108, 7130, 92, 7001 e 9054.

- 3) Elevando-se o nível de tensão nessas dez barras a nova margem de carga é $\lambda = 0.05305$.

Verifica-se que, nesse caso, as ações de controle não proporcionaram um significativo aumento da margem de carga, ou seja, as ações de controle disponíveis não são suficientes para retardar eficientemente o ponto de colapso.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato dos geradores eletricamente próximos à área crítica, ou seja, aquela área que contém a barra crítica real, atingirem seus limites de geração de potência reativa durante o processo de colapso de tensão, visto que eles tentam prover o suporte de potência reativa necessário à área crítica. Dessa forma, é possível que no ponto de colapso os geradores que ainda não atingiram seus limites de fornecimento de potência reativa estejam eletricamente distantes da área crítica e nesse caso tais ações de controle não produzem efeitos significativos.

A Figura 4.3 mostra as curvas P-V para a barra 526, para os casos com e sem ações de controle.

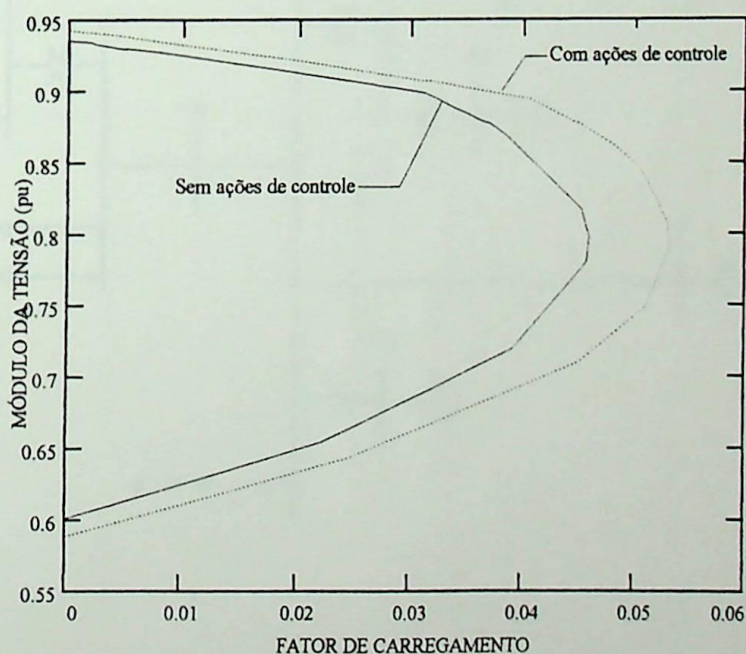


Figura 4.3 Curvas P-V da barra 526 - Casos com limites

Se as ações de controle forem tomadas em relação a outra barra, como por exemplo a 192, identificada como a barra crítica real para o caso sem limites, a margem de carga

obtida seria $\lambda = 0.05261$, que é um resultado bastante próximo daquele obtido quando as ações de controle são determinadas em relação à barra crítica real.

A Figura 4.4 apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE-300 barras nas proximidades da barra 526.

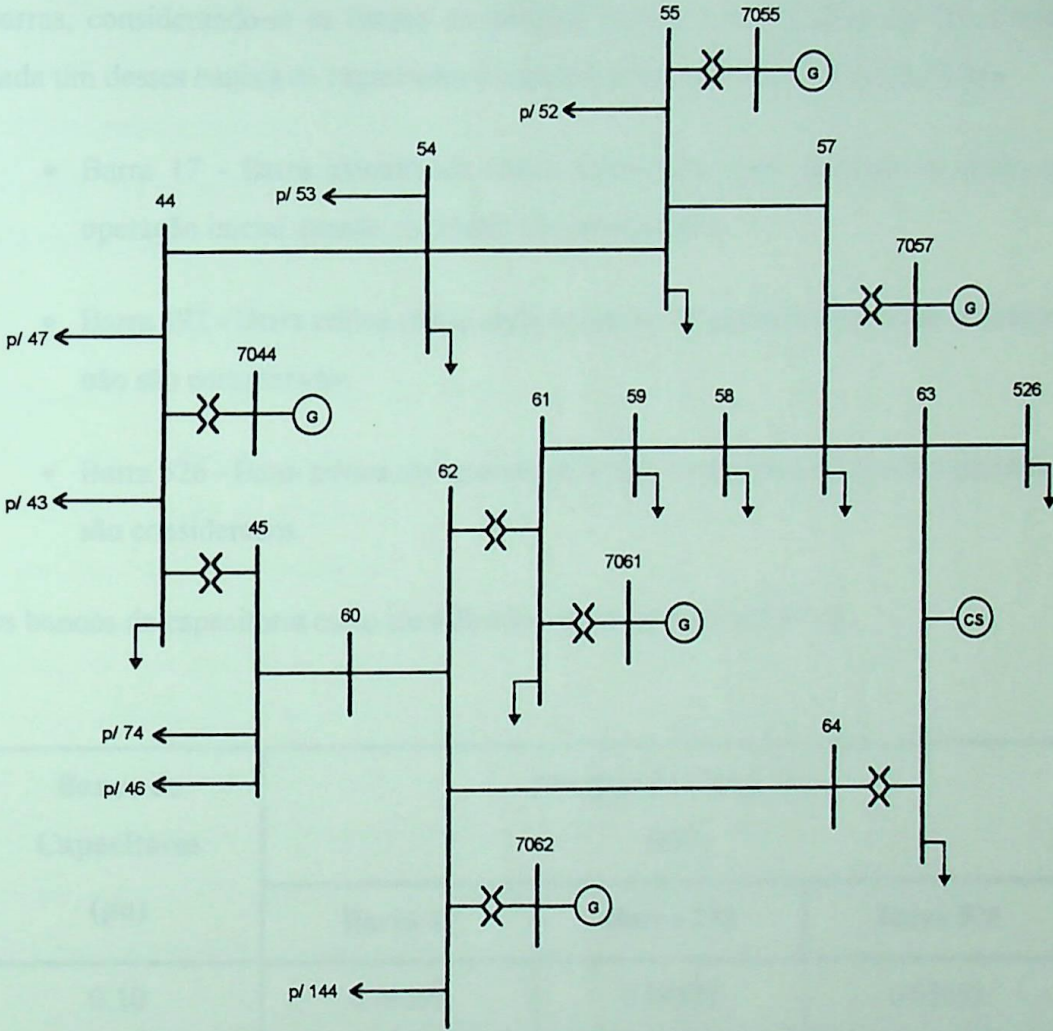


Figura 4.4 Sistema IEEE-300 barras nas proximidades da barra 526

4.3.2 Ações de Controle Local

O resultado da seção anterior poderia levar à conclusão de que se os limites de potência reativa são considerados, a identificação da barra crítica não tem muito sentido. Entretanto, a adequada identificação da barra ou área crítica permite melhorar o suporte local de potência reativa, através da alocação de, por exemplo, bancos de capacitores “shunt”. A Tabela 4.2, a seguir, apresenta uma comparação entre as margens de carga obtidas quando os mesmos bancos de capacitores “shunt” são instalados em diferentes barras, considerando-se os limites de potência reativa dos geradores. As barras onde cada um desses bancos de capacitores é instalado são escolhidas da seguinte forma:

- Barra 17 - Barra identificada como crítica pelo vetor tangente no ponto de operação inicial quando os limites são considerados.
- Barra 192 - Barra crítica real quando os limites de potência reativa dos geradores não são considerados.
- Barra 526 - Barra crítica real quando os limites de potência reativa dos geradores são considerados.

Os bancos de capacitores estão identificados em pu na base 100 MVA.

Banco de Capacitores (pu)	Margem de Carga (λ) (pu)		
	Barra 17	Barra 192	Barra 526
0.10	0.04595	0.04579	0.05633
0.30	0.04704	0.04583	0.07784
0.50	0.04783	0.04586	0.09890

Tabela 4.2 Ponto de colapso de tensão com banco de capacitores instalado

Pode-se observar, da Tabela 4.2, que a barra crítica real é a mais indicada para a alocação de banco de capacitores, uma vez que ela fornece melhor margem de carga quando ações de controle locais são aplicadas. Esse resultado era esperado uma vez que o fenômeno de colapso de tensão é caracterizado por um elevado carregamento de potência reativa na área crítica, ou seja, nas linhas de transmissão eletricamente próximas à barra crítica. Por essa razão, a alocação do banco de capacitores “shunt” traz um alívio local no carregamento de potência reativa, aumentando, em consequência, a margem de carga.

Poderia ser argumentado que a instalação do banco de capacitores na barra 192 proporcionaria melhores resultados se os limites de potência reativa dos geradores não fossem considerados. Entretanto, os resultados apresentados na seção anterior mostraram que esses limites devem ser considerados.

Deve-se ressaltar que a instalação em uma determinada barra do sistema de um banco de capacitores ‘shunt’ ou de um compensador estático de mesma potência capacitiva que o banco de capacitores proporcionam as mesmas margens de carga, visto que ao atingir seu limite de geração de potência reativa o compensador estático comporta-se como um banco de capacitor fixo.

A Figura 4.5 mostra as curvas P-V para o caso de instalar-se na barra 526 um compensador estático de potência capacitiva 0.5 pu ou um banco de capacitores “shunt” de mesma potência. Observa-se que apenas o perfil dessas curvas diferem, onde para o caso do compensador estático a tensão é mantida fixa no valor de referência, no caso 1.0 pu, até que ele atinja seu limite de geração de potência reativa, ponto a partir do qual ambas as curvas passam a coincidir.

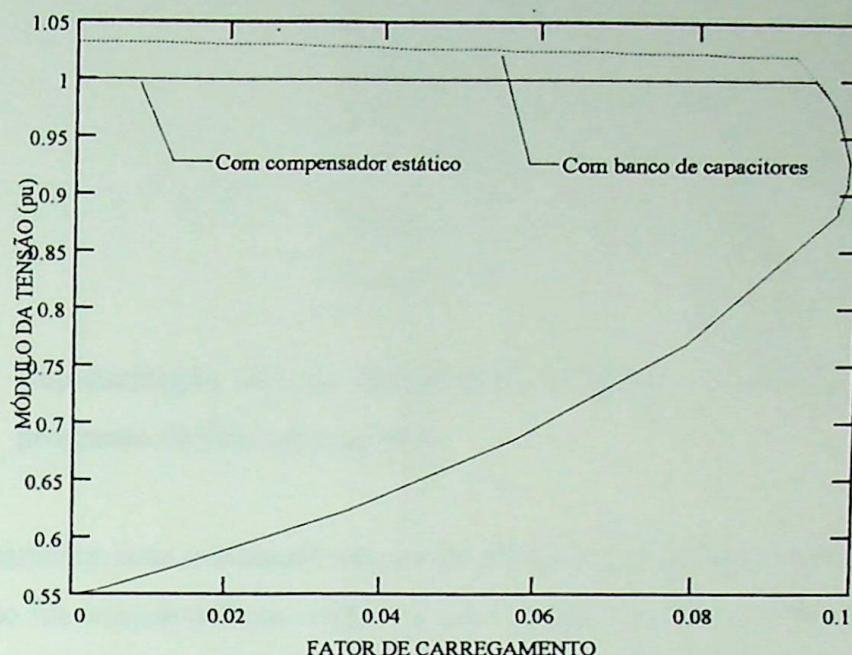


Figura 4.5 Curvas P-V da barra 526 - com compensador estático ou banco de capacitores

Deve-se esclarecer que existem limitações para representar corretamente um compensador estático dentro de um programa de fluxo de potência quando um dos seus limites nominais é atingido. Em tais programas, enquanto seus limites não são atingidos um compensador estático comporta-se como uma barra de tensão controlada. Entretanto, ao atingir um dos extremos passam a comportar-se como barras de carga tipo potência constante. Porém, na realidade os compensadores estáticos tornam-se uma impedância fixa ao atingirem seus limites de potência reativa.

Para resolver esse problema é possível utilizar um artifício, desde que se tenha um conhecimento prévio de como o equipamento será exigido [40]. No caso dele vir certamente a gerar potência reativa, que é o caso de interesse neste trabalho, pode-se colocar seu limite capacitivo como uma impedância fixa na barra e subtrair de seus limites originais a quantidade correspondente de potência reativa. No caso simulado, considerando-se um compensador estático de, por exemplo, ± 50 MVar, efetuou-se sua representação como um banco de capacitores “shunt” fixo de 50 MVar conectado em uma barra de tensão controlada cujos limites de potência reativa sejam -100 e 0 MVar. A Figura 4.6 ilustra essa representação.

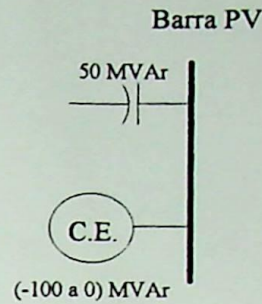


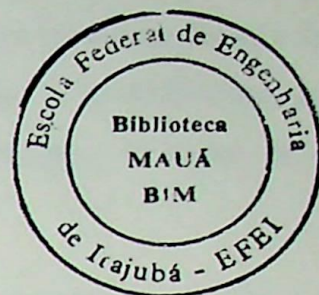
Figura 4.6 Representação de um compensador estático de ± 50 MVar em um programa de fluxo de potência

Realizou-se também uma simulação considerando-se a utilização de um capacitor série. Sua instalação foi considerada na única linha de transmissão que atende à barra 526, ou seja, a linha entre as barras 63 e 525, compensando 55 % da reatância da mesma, o que corresponde a um capacitor série de aproximadamente 36 MVar. A margem de carga obtida foi $\lambda = 0.09621$, que é um resultado bastante próximo daquele obtido quando instala-se um banco de capacitores “shunt” de 50 MVar na barra 526.

Ressalta-se que não se tem intenção neste trabalho de analisar outros aspectos relativos ao capacitor série, tais como custos ou mesmo problemas de ressonância subsíncrona e sobretensões transitórias quando de defeito na rede, mas apenas mostrar o ganho que sua instalação proporciona com relação à margem de estabilidade de tensão. Adicionalmente, não se pode afirmar, a princípio, que a linha de transmissão que atende a barra crítica seja aquela onde a instalação de um capacitor série de determinada potência nominal oferecerá maior margem de carga.

Capítulo 5

CONCLUSÕES



5.1 Problema Examinado

O fenômeno do colapso de tensão tem-se mostrado um ponto de interesse de pesquisadores por todo o mundo, uma vez que os sistemas elétricos de potência vêm operando sob condições cada vez mais severas e diversas ocorrências devidas a esse fenômeno vêm sendo relatadas.

Tem sido reconhecido que o colapso de tensão inicia-se localmente, propagando-se pela vizinhança. Em função dessa característica, uma análise estática da estabilidade de tensão foi feita neste trabalho, onde se propôs a determinação de ações de controle baseadas no conhecimento da barra crítica do sistema. Na pesquisa por um índice de colapso de tensão, algumas técnicas para identificação dessa barra foram comparadas.

Resultados aplicados ao sistema IEEE-300 barras foram mostrados, onde os limites de geração de potência reativa foram considerados. Para a realização dos testes utilizou-se um fluxo de potência através do método da continuação (PFLOW) e rotinas desenvolvidas em MATLAB.

5.2 Contribuições

Este trabalho apresentou um importante aspecto com relação à análise da estabilidade de tensão: a identificação de ações de controle para melhorar o balanço "potência reativa x tensão" de um sistema.

A proposta para determinação de ações de controle foi baseada no conhecimento da barra crítica do sistema, que foi diretamente obtida pela maior entrada no vetor tangente. Na comparação com outras técnicas observou-se que, além da determinação

simples, uma vantagem significativa do uso do vetor tangente para identificação da barra crítica reside no fato dessa técnica identificar a barra crítica real para pontos distantes do ponto de colapso de tensão, possibilitando que essa identificação seja feita utilizando-se um programa convencional de fluxo de carga. Adicionalmente, essa técnica pode ser utilizada como índice para avaliação da margem de carga de um sistema [25].

Ações de controle sobre geradores foram determinadas através de matrizes de sensibilidade, calculadas para cada gerador em relação à barra crítica. Foi observado que o aumento de geração de potência reativa nos geradores não foi capaz de mudar significativamente o ponto de colapso. Uma ação de controle local foi então proposta, através da instalação de banco de capacitores “shunt” na barra crítica do sistema, onde resultados satisfatórios foram obtidos. Também foram mostrados os resultados para o caso de instalação de um compensador estático na referida barra ou um capacitor série na linha de transmissão que atende a barra crítica.

Através dos testes realizados ficou caracterizado que o colapso de tensão é um fenômeno local pois para aumentar-se a margem de estabilidade de tensão há necessidade da potência reativa ser injetada localmente na área crítica, sendo pouco efetivo injetar-se potência reativa de um ponto remoto.

Os efeitos de considerar-se os limites de potência reativa dos geradores mostraram-se importantes na determinação de ações de controle e da margem de carga. A barra crítica varia quando esses limites são considerados e uma margem de carga menor é obtida.

Também foi observado que em função da técnica utilizada a barra crítica real pode vir a ser identificada apenas no ponto de colapso de tensão. Nesse caso, se um fluxo de carga convencional for utilizado, através de sucessivas simulações considerando aumentos graduais de carga, até que divirja, as informações obtidas a partir do último ponto em que foi obtida solução podem não identificar a barra crítica real e assim a ação de controle local a ser implementada pode não ser a mais eficaz.

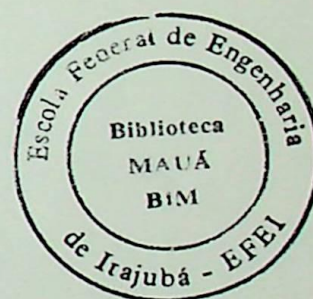
Conclui-se, portanto, que o conhecimento da barra crítica real de um sistema desempenha um papel importante na determinação das ações de controle, permitindo

melhorar a condição global de estabilidade de tensão através da compensação local de potência reativa.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Alguns desenvolvimentos adicionais podem ser realizados, sendo sugerido os seguintes trabalhos futuros:

- Analisar o efeito da modelagem de carga na determinação de ações de controle, destacando-se a utilização de motores de indução na composição da carga.
- Avaliar a utilização de corte de carga como ação de controle para prevenção do colapso de tensão.
- Efetuar uma análise das margens de carga de um sistema de potência em função da instalação de capacitores série, cuja localização seja definida com base na identificação do ramo crítico.



Apêndice I

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO E DA POTÊNCIA ATIVA EM UMA BARRA DE CARGA

O circuito equivalente de uma fonte infinita alimentando uma carga variável $P + j Q$ através de uma linha de transmissão pode ser ilustrado conforme a Figura I.1.

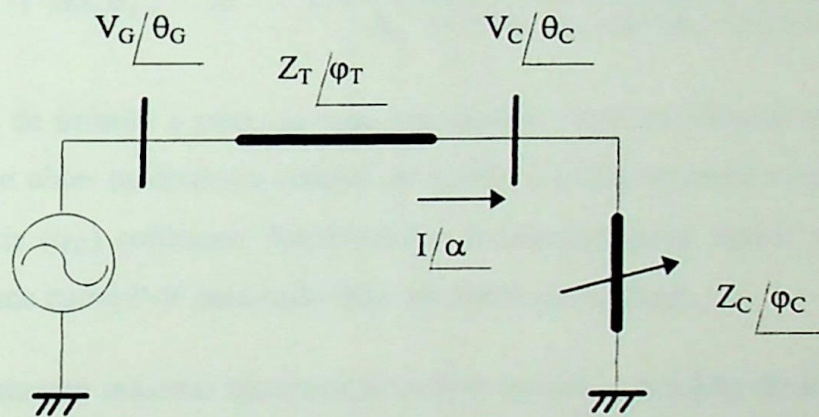


Figura I.1 Circuito equivalente para o sistema em análise

Onde:

$$Z_T / \phi_T = Z_T \cos(\phi_T) + j Z_T \sin(\phi_T) \quad (I.1)$$

$$Z_C / \phi_C = Z_C \cos(\phi_C) + j Z_C \sin(\phi_C) \quad (I.2)$$

Fazendo-se:

$$Z / \phi = Z_T / \phi_T + Z_C / \phi_C \quad (I.3)$$

$$Z / \phi = [Z_T \cos(\phi_T) + Z_C \cos(\phi_C)] + j [Z_T \sin(\phi_T) + Z_C \sin(\phi_C)] \quad (I.4)$$

Então:

$$Z = \sqrt{Z_T^2 + 2 \cdot Z_T \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_T - \varphi_C) + Z_C^2} \quad (I.5)$$

Assim sendo, a expressão para o módulo da corrente é dada por:

$$I = \frac{V_G}{Z} \Rightarrow I = \frac{V_G}{\sqrt{Z_T^2 + 2 \cdot Z_T \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_T - \varphi_C) + Z_C^2}} \quad (I.6)$$

Portanto, tem-se que o módulo da tensão na barra de carga será dada por:

$$V_C = I \cdot Z_C \Rightarrow V_C = \frac{V_G \cdot Z_C}{\sqrt{Z_T^2 + 2 \cdot Z_T \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_T - \varphi_C) + Z_C^2}} \quad (I.7)$$

E para a potência ativa da carga tem-se:

$$P = V_C \cdot I \cdot \cos(\varphi_C) \Rightarrow P = \frac{V_G^2 \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_C)}{Z_T^2 + 2 \cdot Z_T \cdot Z_C \cdot \cos(\varphi_T - \varphi_C) + Z_C^2} \quad (I.8)$$

Variando-se Z_C de infinito à zero, ou seja, variando a carga de circuito aberto a curto-circuito, pode-se obter os diversos valores de tensão e potência ativa na carga para um fator de potência (φ_C) constante. Repetindo-se o processo para outros valores de φ_C pode-se obter uma curva P-V para cada fator de potência da carga.

Como o carregamento máximo transmitido ocorre quando o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão, ao fazer-se $Z_C = Z_T$ nas Equações I.7 e I.8 obtêm-se as seguintes expressões para o módulo da tensão crítica na barra de carga e a correspondente carga ativa máxima, para cada fator de potência:

$$V_{\text{CRIT}}(\varphi_C) = \frac{V_G}{2 \cdot \cos \frac{\varphi_T - \varphi_C}{2}} \quad (I.9)$$

$$P_{\text{MAX}}(\varphi_C) = \frac{V_G^2 \cdot \cos(\varphi_C)}{2 \cdot Z_T \cdot [1 + \cos(\varphi_T - \varphi_C)]} \quad (I.10)$$

Variando-se o fator de potência obtêm-se o lugar dos pontos críticos.

Apêndice II

EQUACIONAMENTO DAS POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA EM FUNÇÃO DO MÓDULO E ÂNGULO DA TENSÃO

Como no caso não há perdas

Considerando-se o circuito apresentado na Figura 2.3 tem-se que a potência transferida da barra de carga para a de geração é dada por:

$$\dot{S}_{CG} = \dot{V}_C \dot{I}_C^* \quad (\text{II.1})$$

Sendo

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{V}_C - \dot{V}_G}{\dot{Z}_T} \quad (\text{II.2})$$

Então:

$$\dot{S}_{CG} = V_C \angle \theta_C \left(\frac{V_C \angle -\theta_C - V_G \angle -\theta_G}{Z_T \angle -\phi_T} \right) \quad (\text{II.3})$$

ou

$$\dot{S}_{CG} = \frac{V_C^2 \angle \alpha_T}{Z_T} - \frac{V_C V_G \angle \theta_C - \theta_G + \alpha_T}{Z_T} \quad (\text{II.4})$$

Sendo,

$$\dot{S}_{CG} = P_{CG} + jQ_{CG} \quad (\text{II.5})$$

e tomando-se, separadamente, as partes real e imaginária da Equação II.4, obtém-se:

$$P_{CG} = \frac{V_C^2 \cos(\alpha_T)}{Z_T} - \frac{V_C V_G \cos(\theta_C - \theta_G + \alpha_T)}{Z_T} \quad (\text{II.6})$$

e

$$Q_{CG} = \frac{V_C^2 \sin(\alpha_T)}{Z_T} - \frac{V_C V_G \sin(\theta_C - \theta_G + \alpha_T)}{Z_T} \quad (\text{II.7})$$

Como no caso em análise

$$P_{CG} = -P$$

e

$$Q_{CG} = -Q$$

Então as Equações II.6 e II.7 podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{\cos(\alpha_T)}{Z_T} V_C^2 - \frac{V_G \cos(\theta_C - \theta_G + \alpha_T)}{Z_T} V_C + P = 0 \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{\sin(\alpha_T)}{Z_T} V_C^2 - \frac{V_G \sin(\theta_C - \theta_G + \alpha_T)}{Z_T} V_C + Q = 0 \quad (\text{II.9})$$

Substituindo-se os valores conhecidos de V_G , θ_G , Z_T , α_T , P e Q , e arbitrando-se valores para θ_C , pode-se resolver as Equações II.8 e II.9 de modo a obter-se valores correspondentes para V_C , o que permite traçar as curvas $V \times \theta$.

Apêndice III

REGRA DE SCHUR

Seja a matriz quadrada

$$A = \begin{bmatrix} A1 & A2 \\ A3 & A4 \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

onde $A1$, $A2$, $A3$ e $A4$ são matrizes resultantes de uma partição da matriz A , tal que $A1$ e $A4$ são quadradas.

Então, para

$$A' = A4 - A3 A1^{-1} A2 \quad (\text{III.2})$$

e se $A1$ é não-singular, tem-se:

$$\det(A) = \det(A1) \det(A') \quad (\text{III.3})$$

Referências Bibliográficas

- [1] KUNDUR, P. **Power system stability and control**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [2] TAYLOR, C. W. et al. Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena. **CIGRE Task Force 38-02-10**. 1992.
- [3] TAYLOR, C. W. **Power system voltage stability**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [4] CLARK, H. K. New challenge: Voltage Stability. **IEEE Power Engineering Review**, apr. 1990.
- [5] KUNDUR, P., GAO, B. Practical considerations in voltage stability assessment. **Proceedings of IV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning**. Foz do Iguaçu, 1994.
- [6] GCOI/SCel/GTEE. **Modelos de carga para estudos de estabilidade e fluxo de carga**. Relatório técnico SCel-GTEE-001/89, nov. 1989.
- [7] PRICE, W. W. et al. Load representation for dynamic performance analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.8, n.2, p.472-482, may 1993.
- [8] D' AJUZ, A. et al. **Equipamentos elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão**. Rio de Janeiro: FURNAS - Niterói: Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- [9] CAMPANHOLO FILHO, B., ARAÚJO, J. M., GERALDES FILHO, W. et al. Modelagem de cargas em estudos e análise de sistemas sujeitos a instabilidade de tensão. **Anais do XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Recife, 1993.

- [10] 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.
- [11] IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. Suggested techniques for voltage stability analysis. **IEEE publication 93TH0620 - 5PWR**, 1993.
- [12] MANSOUR, Y. Voltage Stability. **Course: Modern topics in power system planning and operations considering new power sector models**. CIGRÉ, Recife, may 1996. (Course notes).
- [13] MARTINS, A. C. B. et al. Estudos e ferramentas de estabilidade de tensão utilizados no âmbito do planejamento da operação elétrica do sistema interligado. **Anais do XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Florianópolis, 1995.
- [14] SAUER, P. W., PAI, M. A. Power system steady-state stability and the load-flow Jacobian. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.5, n.4, p.1374-1383, nov. 1990.
- [15] MORISON, G. K., GAO, B., KUNDUR, P. Voltage stability analysis using static and dynamic approaches. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.8, n.3, p.1159-1171, aug. 1993.
- [16] VENIKOV, V. A. et al. Estimation of electrical power system steady-state stability in load flow calculations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-94, n.3, p.1034-1041, may/june 1975.
- [17] LÖF, P. A. et al. Fast calculation of a voltage stability index. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.7, n.1, p.54-64, feb. 1992.
- [18] GAO, B., MORISON, G. K., KUNDUR, P. Voltage stability evaluation using modal analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.7, n.4, p.1529-1542, nov. 1992.

- [19] CAÑIZARES, C. A., SOUZA, A. C. Z., QUINTANA, V. H. Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse. **IEEE/PES Summer Meeting - Paper 95, SM 583-5 PWRs**, Portland, July 1995.
- [20] PRADA, R. B. **Projeto de pesquisa: estabilidade de tensão**. Rio de Janeiro: Convênio PUC/RJ - ELETROBRÁS, 1992.
- [21] PRADA, R. B., ZAMBRONI, A. C., VIEIRA FILHO, X. et al. Phenomena characterization based on reactive control effects and system critical areas identification. **Proceedings of III Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning**. Belo Horizonte, 1992.
- [22] GOMES, P., SANTOS, M. G., PRADA, R. Introdução dos estudos sobre estabilidade de tensão no planejamento da operação elétrica. **Anais do XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Recife, 1993.
- [23] CAÑIZARES, C. A., SOUZA, A. C. Z., QUINTANA, V. H. Improving continuation methods for tracing bifurcation diagrams in power systems. **Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III - Voltage Stability and Security**, ECC Inc., Davos, Switzerland, 1994.
- [24] SOUZA, A. C. Z. **New techniques to efficiently determine proximity to static voltage collapse**. Waterloo: University of Waterloo, 1995. (PhD thesis).
- [25] SOUZA, A. C. Z. Determinação da barra crítica e do ponto de colapso pelo vetor tangente. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática**. São Paulo, 1996.
- [26] CAÑIZARES, C. A., ALVARADO, F. L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.8, n.1, p.1-8, feb. 1993.

- [27] AJJARAPU, V., CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.7, n.1, p.416-423, feb. 1992.
- [28] CHIANG, H. D. et al. CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.10, n.2, p.623-634, may 1995.
- [29] SOUZA, A. C. Z. **Uma avaliação do fenômeno do colapso de tensão**. Rio de Janeiro: PUC/RJ, 1990. (Dissertação de Mestrado).
- [30] SCHLUETER, R. A., HU, I., CHANG, M. W. et al. Methods for determining proximity to voltage collapse. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.6, n.1, p.285-292, feb. 1991.
- [31] TUAN, T. Q., FANDINO, J., HADJSAID, N. et al. Emergency load shedding to avoid risks of voltage instability using indicators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.9, n.1, p.341-348, feb. 1994.
- [32] WEEDY, B. M. **Sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1973.
- [33] THE MATH SOFT INC. **MATCAD user's guide**. Cambridge, 1994.
- [34] HECKE, J. V. et al. Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena. **Électra**, n. 159, apr. 1995.
- [35] PRADA, R. B., PESSANHA, J. E. O. Um programa computacional para análise e ilustração do fenômeno de estabilidade de tensão. **Anais do XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Recife, 1993.
- [36] HORN, R. A., JOHNSON, C. R. **Matrix analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [37] STOER, J., BULIRSCH, R. **Introduction to numerical analysis**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 1993.

- [38] CAÑIZARES, C. A. **Voltage collapse and transient energy function analyses of AC/DC systems**. University of Wisconsin-Madison, 1991. (PhD thesis).
- [39] THE MATH WORKS INC. **MATLAB user's guide**. Massachusetts , 1993.
- [40] ELLERY, E. Modelagem de compensadores estáticos para simulações digitais. **Curso sobre compensação de reativos em sistemas elétricos de potência**. ELETROBRÁS/UFU, Uberlândia, jul. 1989. (Notas de aula).

DATA	04/06/1997
PROC.	
PED.	PPG
LIV.	
RS	Doafab

