

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Aspectos Práticos e Teóricos na Análise de Estabilidade de Tensão

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

José Maciel Filho

Itajubá, Junho de 2006

Aspectos Práticos e Teóricos na Análise de Estabilidade de Tensão

Dissertação apresentada à Universidade Federal 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

José Maciel Filho

Itajubá, Junho de 2006

Aos meus filhos,

Jessica e Vinícius

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Maciel e Luzia Lima Maciel, pela formação que tornou possível minha chegada até aqui.

À minha esposa, Maria Helena, pela paciência, estímulo e compreensão.

Ao professor Antônio Carlos Zambroni, pela orientação, amizade e principalmente pelo grande incentivo e compreensão.

À minha gerente Maria Cláudia Ferreira, que acreditou em mim e pelo apoio prestado.

Aos funcionários da PPG-UNIFEI, especialmente a funcionária Cristina, pela destreza, atenção e amizade.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	V
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	X
CAPÍTULO 1	1
ESTABILIDADE DE TENSÃO: CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	2
1.2.1 Estabilidade Angular	4
1.2.1.1 Estabilidade a Pequenos Sinais.....	4
1.2.1.2 Estabilidade Transitória.....	4
1.2.2 Estabilidade de Frequência.....	5
1.2.3 Estabilidade de Tensão	6
1.2.3.1 Fatores de Influência.....	6
1.2.3.2 Mecanismo da Perda da Estabilidade de Tensão	11
1.2.4 Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular.....	12
1.3 MÉTODOS DE ANÁLISE	14
1.3.1 Análise Dinâmica	15
1.3.2 Análise Estática	16

1.4 UM BREVE HISTÓRICO BIBLIOGRÁFICO	17
1.5 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS DO FENÔMENO	22
1.5.1 Ocorrências no Brasil	23
1.5.1.1 Ocorrência de Abril de 1997.....	23
1.5.1.2 Ocorrência de Novembro de 1997.....	25
1.6 PROPOSTAS DO TRABALHO	25
CAPÍTULO 2	28
FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESTÁTICA.....	28
2.1 INTRODUÇÃO.....	28
2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE ESTÁTICA.....	29
2.2.1 Teoria da Bifurcação	30
2.2.1.1 Características da bifurcação Sela-nó.....	30
2.2.1.2 Sela-nó em Sistemas de Potência	33
2.2.2 Análise pelos Mínimos Autovalor e Valor Singular	36
2.2.2.1 Decomposição de uma Matriz por Autovalores e V. Singulares.....	37
2.2.2.2 Decomposição de uma Matriz por Valores Singulares.....	37
2.2.2.3 Interpretação dos Autovalores/Valores Singulares.....	38
2.2.3 Análise pelo Determinante Reduzido	41

2.3 MÉTODO DA CONTINUAÇÃO	46
2.3.1 Formulação Matemática	46
2.3.2 Previsor, Controle do Tamanho do Passo e Parametrização.	47
2.3.3 Corretor.....	50
2.3.4 Síntese do Método da Continuação	50
2.3.5 Método do Vetor Tangente.....	51
2.4 CONCLUSÃO.....	57
CAPÍTULO 3.....	59
ASPECTOS TEÓRICOS E RESULTADOS.....	59
3.1 INTRODUÇÃO.....	59
3.2 IDENTIFICAÇÃO DO AUTOVALOR DE INTERESSE COM..... CONSIDERAÇÕES DE LIMITES DE POTÊNCIA REATIVA	61
3.2.1 Teorema da variedade de centro	61
3.2.2 Autovalor de Interesse quando se consideram os Limites de Potência Reativa .	66
3.2.3 Testes considerando Limites de Potência Reativa	67
3.2.4 Conclusão.....	68
3.3 AÇÕES DE CONTROLE: CORTE DE CARGA NA ÁREA SÃO PAULO	69
3.3.1 Descrição da Área São Paulo	69
3.3.2 Política de Corte de Carga para a Área São Paulo	71

3.3.3	Resultados dos Testes	73
3.3.3.1	<i>Caso Base</i>	73
3.3.3.2	<i>Fazendo Corte de Carga</i>	74
3.3.3.3	<i>Margem de Carga</i>	75
3.3.3.4	<i>Grupos de Barras Críticas por Área</i>	77
3.3.3.5	<i>Compensação Reativa</i>	78
3.4	CONCLUSÕES	79
CAPÍTULO 4	.....	81
CONCLUSÕES	.....	81
4.1	PROBLEMA EXAMINADO.....	81
4.2	CONTRIBUIÇÕES	82
4.3	SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	84
ANEXO I	.....	92
ANEXO II	.....	93
ANEXO III	.....	95

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.

Assim surgiu a motivação de se fazer um estudo para adoção de política de corte de carga na Área São Paulo, tendo como resultado a elevação da margem de carga para o sistema elétrico de potência.

A proposta consiste em comparar a política empregada pelas empresas do setor elétrico da Área São Paulo para corte manual de carga numa situação de necessidade, em relação à técnica do Vetor tangente. O Vetor Tangente indica as barras críticas do sistema e nessas barras serão praticados os mesmos montantes de corte de carga, com o objetivo de se comparar com a política empregada pelas Empresas.

Numa segunda etapa será adotada compensação shunt adicional e verificado o comportamento da margem de carga do sistema, quando esta compensação é feita nos conjuntos de barras críticas ou naquelas barras indicadas pelas Empresas.

Outro assunto em consideração tem um conteúdo basicamente teórico, cuja motivação é identificar um autovalor que esteja associado à barra crítica e mostrar qual é o comportamento do mesmo, quando se faz incremento de carga no sistema, com considerações de limites de potência reativa dos geradores.

Abstract

This document concerns about the voltage stability phenomenon, which have been a growing interesting issue during the last years. Economics and ecological restrictions are causing an operation of several electrical systems under hard conditions, leading to several incidents around the world and problem over the voltage stability.

The motivation behind this study comes from the adoption of a politic of cutoff load in São Paulo Area, as a result a raise load margin to the electrical power system.

The proposal consists in compare the politic used by the companies in the electric sector of São Paulo Area to manual load cutoff in a necessity situation, with the tangent vector techniques. The tangent vector indicate the critical bus from the system where is used the same amount of cutoff load, with the purpose to compare with the politic used by these companies.

In the second step additional shunt compensation will be adopted and the behavior of the load margin of the system will be checked, when this compensation is done in the group of critical bus or in the critical bus suggested by the companies.

Another issue included here is basically theoretical which the motivation is to find an eigenvalue that is connected to the critical bus e indicate the behavior of that, when the load of system is increased, considering the reactive power limits of the generators.

CAPÍTULO 1

ESTABILIDADE DE TENSÃO: CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO

1.1 INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas elétricos de potência tem sido caracterizada pela escalada de crescimento da carga, pelo aumento das interligações, maior uso de tecnologias e controle. A incapacidade de prover os sistemas elétricos de potência, dos reforços necessários na mesma magnitude do crescimento da carga, seja por escassez de recursos financeiros, seja por restrições de natureza ambiental ou regulatória, desencadearam-se discussões a respeito da aproximação do ponto de operação do sistema a limites aparentemente perigosos.

Inicialmente, o enfoque havia sido a estabilidade angular, na forma de estabilidade transitória, devido à relativa folga existente na operação do sistema elétrico de potência. Sobretudo, esse quadro começava a sofrer modificações, a partir da década de 70.

A estabilidade transitória pode ser caracterizada por um evento rápido, onde a perda de um equipamento vital de controle exige do sistema uma resposta dinâmica suficientemente forte para manter a estabilidade. A análise desse fenômeno requer uma modelagem detalhada do sistema, incluindo as características transitórias dos geradores.

A classificação da estabilidade em categorias facilita o entendimento do problema, à medida que pode identificar fatores essenciais que contribuem para a instabilidade. Tal classificação será apresentada na seção seguinte.

1.2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Estabilidade de um sistema de potência é a capacidade que este sistema tem de manter um ponto de equilíbrio sob condições normais de operação e permanecer num estado aceitável de equilíbrio depois de ter sofrido uma perturbação. Estabilidade é uma condição de equilíbrio entre forças opostas [1].

Estabilidade de tensão é a capacidade de um sistema de potência de se manter estável de modo que, se a impedância da carga aumenta, a potência da carga diminui e tensão e potência são controláveis [2].

Colapso de tensão é o processo através do qual a instabilidade de tensão conduz o sistema à perda de tensão em uma parte significativa do mesmo [2].

Tradicionalmente o problema de estabilidade foi tratado como uma manutenção de sincronismo do sistema. Entretanto, a instabilidade em sistemas de potência pode se manifestar em diferentes formas, dependendo da configuração do sistema, do modo de operação e da forma do distúrbio. A instabilidade pode ocorrer sem perda de sincronismo, como por exemplo, a instabilidade devido ao colapso de tensão de uma carga suprida por um gerador síncrono através de uma linha de transmissão [3].

Outra possibilidade de evento é a ocorrência de um desbalanço significativo entre carga e geração, onde tanto o gerador como seu regulador de velocidade tornam-se peças importantes na análise da estabilidade, juntos com os demais controles do sistema e proteções especiais. Não havendo uma coordenação apropriada entre estes dispositivos, a perda intempestiva de geradores e ou cargas podem causar o colapso, devido à instabilidade da frequência.

Um ponto de operação normal (ou ponto de equilíbrio) não deve ser entendido como um ponto estático. Um sistema está continuamente submetido a pequenas perturbações representadas pela variação de carga e pelas diversas ações de controle. Como exemplo, podem ser citados os controles de tensão e frequência, como a variação dos tapes de um OLTC (comutador de tap sob carga) ou a ação da malha do CAG (controle automático de geração). As grandes perturbações se referem a eventos menos corriqueiros, mas passíveis de ocorrer a qualquer instante. Em qualquer situação mencionada, para que seja mantida a estabilidade é preciso que após a ocorrência do distúrbio, o sistema volte a operar de forma satisfatória.

Kundur [1] observa que a instabilidade de tensão nem sempre ocorre sozinha. Muitas vezes, a instabilidade de ângulo e tensão caminham juntas. Uma pode seguir a outra e a distinção entre elas é importante para o entendimento das causas reais dos problemas e para a adoção de procedimentos operativos no sistema.

As referências [1,4] também alertam para a distinção entre instabilidade e colapso de tensão. O fenômeno de colapso de tensão está ligado à seqüência de eventos que acompanham a instabilidade de tensão, como a queda em níveis inaceitáveis do perfil de tensão em uma significativa região do sistema. A instabilidade de tensão pode, diferentemente do colapso, provocar elevação da tensão. O colapso de tensão pode estar associado tanto com a instabilidade de tensão como com a instabilidade angular.

Kundur [1,5] propõe uma classificação para estudos de estabilidade baseada na natureza física da instabilidade (ângulo, frequência ou tensão), na dimensão da perturbação considerada, no método apropriado para análise, nos mecanismos, nos processos e extensão dos tempos envolvidos.

1.2.1 Estabilidade Angular

Diz respeito à habilidade dos geradores síncronos interligados de permanecer em equilíbrio (sincronismo) em regime normal de operação e após a ocorrência de algum distúrbio. Tal equilíbrio está associado à capacidade de manter ou restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o mecânico de cada máquina. Caso contrário, a instabilidade resultante ocorre em forma de aumento das oscilações angulares de algum gerador, levando a perda de sincronismo com outros geradores. Duas classes de estabilidade podem ser usadas para caracterizar a estabilidade de ângulo do rotor:

1.2.1.1 Estabilidade a Pequenos Sinais

Mesmo após a ocorrência de um pequeno distúrbio, o sistema de potência mantém o sincronismo. Os distúrbios são considerados suficientemente pequenos, o que permite a linearização do sistema de equações para a análise.

A análise a pequenos sinais usando técnicas lineares depende do ponto de operação do sistema e traz informações valiosas a respeito da característica dinâmica do sistema de potência neste ponto.

1.2.1.2 Estabilidade Transitória

É relativa à capacidade do sistema de potência em manter o sincronismo após um distúrbio transitório severo. Envolve grandes excursões do ângulo do rotor do gerador e é influenciada pela relação não linear entre potência-ângulo.

A estabilidade transitória depende tanto do ponto de operação inicial do sistema como da severidade da perturbação.

O intervalo de tempo de interesse dos estudos de estabilidade transitória é usualmente limitado em 3 a 5 segundos após a perturbação, podendo ser estendido para 10 segundos em grandes sistemas interligados.

A técnica de simulação não-linear no domínio do tempo e com modelagem transitória convencional é empregada nos estudos de estabilidade transitória.

1.2.2 Estabilidade de Frequência

Estabilidade de frequência é a habilidade do sistema de potência em manter a frequência dentro de uma faixa nominal, em função de uma severa oscilação no sistema. Essa situação é dependente da capacidade do sistema em restaurar o balanço geração/ carga com um mínimo de perda de carga.

Geralmente, os problemas de estabilidade de frequência são associados às inadequadas respostas de equipamentos, fraca coordenação de controles e equipamentos de proteção, ou reserva de geração insuficiente.

Os efeitos da atuação dos controles automáticos de geração (CAG), saturação de transformadores e comportamento da carga fora das condições nominais, são importantes nesta análise.

A técnica de simulação não-linear no domínio do tempo com modelagens mais aprimoradas para as dinâmicas associadas às severas excursões de parâmetros e intervalos de tempo estendidos é indicada para esta análise [6, 7].

1.2.3 Estabilidade de Tensão

Estabilidade de tensão é a habilidade do sistema de potência em manter as tensões de regime permanente aceitáveis em todas as barras do sistema, tanto sob condições normais de operação, como também após um distúrbio [5].

Um sistema sofre instabilidade de tensão quando uma perturbação, crescimento na demanda de carga ou uma mudança nas condições de operação, causa uma progressiva e incontrolável queda ou elevação na tensão [3,8].

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 insuficientes de potência reativa e transmissão de potência através de grandes distâncias.

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.

1.2.3.1 Fatores de Influência

O principal fator responsável pela instabilidade de tensão é a inabilidade do sistema de potência em manter um apropriado balanço de potência reativa e prover um suporte adequado de tensão através do sistema [1]. Entre os principais fatores que influem na estabilidade de tensão, destacam-se:

- **Capacidade dos Geradores:**

A capacidade de fornecimento de potência reativa dos geradores é limitada pelas correntes de campo e armadura. Embora transitoriamente os geradores 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 [10].

- **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 a longas linhas de transmissão para proporcionarem benefícios do ponto de vista da estabilidade angular, vêm encontrando aplicações em linhas mais curtas para melhorar a estabilidade de tensão. Isso decorre da característica de auto-regulação 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. O fato de propiciarem o aparecimento de ressonância subsíncrona e a necessidade da utilização de dispositivos especiais de proteção contra sobretensões são suas desvantagens [11]. De forma similar à compensação “shunt”, uma maior flexibilidade pode ser obtida através do uso de compensação série controlável.

- **Característica das Cargas:**

Um modelo de carga é uma representação matemática da relação entre a tensão em uma barra (amplitude e frequência) e a potência (ativa e reativa) ou corrente fluindo para a carga [10].

A modelagem da carga total de uma subestação é usualmente representada por um modelo composto que considera 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 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 [12].

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 tapes comutáveis sob carga junto às mesmas, quer por usarem termostatos [3,13].

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 a carga ativa e reativa é expressa através das seguintes equações algébricas:

$$P = P_o \left[a_1 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_o} \right) + a_3 \right] \quad (1.1)$$

$$Q = Q_o \left[a_4 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + a_5 \left(\frac{V}{V_o} \right) + a_6 \right] \quad (1.2)$$

onde \mathbf{P} e \mathbf{Q} são as componentes de potência ativa e reativa da carga quando a magnitude da tensão na barra é \mathbf{V} e o subscrito \mathbf{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 são representados por equações diferenciais e, em função do seu detalhamento, podem reproduzir não só o comportamento da carga em regime permanente com também nos transitórios elétricos. Entretanto, em programas como os de análise de estabilidade transitória, utilizam-se modelos dinâmicos, quando uma parcela considerável da carga tem comportamento dinâmico apreciável. Um modelo dinâmico genérico para as cargas de potência constante, aplicável aos estudos de estabilidade de tensão, foi proposto em [14] e tem a seguinte forma:

$$T_L \dot{G} = P_o - V_L^2$$

Onde:

T_L : Constante de tempo

G : Condutância da carga

P_o : Nível de potência de referência

V_L : Tensão na barra da carga

Portanto, 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.

Portanto, 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 se baseando na reprodução de determinadas ocorrências registradas.

1.2.3.2 Mecanismo da Perda da Estabilidade de Tensão

Tendo em vista as características dos principais elementos constituintes de um sistema elétrico de potência e sua influência na estabilidade de tensão, é conveniente explicitar fisicamente, o comportamento conjunto de todo processo do colapso de tensão.

O colapso de tensão é um fenômeno local que se espalha pela vizinhança [5, 15]. 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 [8].

Uma perturbação como perda; de grandes unidades geradoras em uma área de carga, de bancos de capacitores ou compensadores estáticos/ síncronos estratégicos ou de linhas de transmissão importantes, causa um aumento nas perdas de potência reativa e queda da tensão nas áreas de carga. À medida que os tapes de transformadores agem para restaurar os níveis de tensão nas barras de cargas, o perfil de tensão no sistema de transmissão sofre reduções. As unidades geradoras mais próximas, que temporariamente são sobreexcitadas, têm suas excitações retornadas a níveis compatíveis com suas capacidades. Geradores mais distantes deveriam então proporcionar potência reativa, o que é pouco eficiente. Por outro lado, bancos de capacitores “shunt” têm suas potências reativas reduzidas com a tensão, o mesmo se verificando com a potência reativa produzida pela susceptância das linhas de transmissão. A geração e o sistema de transmissão não conseguem mais suportar a carga e as perdas reativas, sofrendo um decaimento rápido do perfil de tensão, com o sistema entrando em um estado de colapso parcial ou total.

1.2.4 Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular

A estabilidade de tensão e a estabilidade angular estão interrelacionadas. A estabilidade de tensão transitória está geralmente associada com a estabilidade angular transitória e formas mais lentas de estabilidade de tensão estão relacionadas com a estabilidade devido a pequenas perturbações. Há portanto, certas dificuldades em separar os mecanismos que regem tais fenômenos.

Entretanto, existem casos onde uma forma de instabilidade predomina. A referência [8] apresenta duas situações extremas:

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

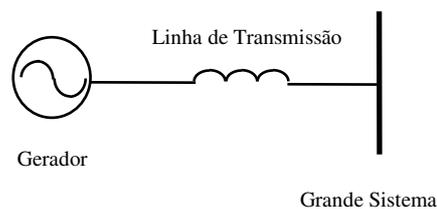


Figura 1.1 Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade angular

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

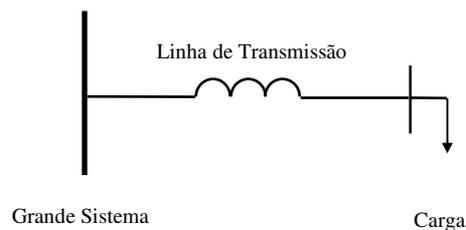


Figura 1.2 Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade de tensão

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 [8,16].

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 colapsa em uma área de carga, existe provavelmente um problema de estabilidade de tensão [8].

1.3 MÉTODOS DE ANÁLISE

A análise da estabilidade de tensão de um sistema de potência requer o exame dos seguintes aspectos [3]:

- Diagnóstico do ponto de operação do sistema. Isto implica em determinar inicialmente, se o ponto de operação é estável sob o ponto de vista de tensão.
- Determinação da barra/ área crítica do sistema de potência, visto que o problema é reconhecido como local.
-

- Margem de carga entre o ponto de operação conhecido e o ponto de colapso de tensão. Cabe aqui, o conhecimento de um método que identifique este ponto de colapso de tensão.

A estabilidade de tensão vem sendo estudada sob o enfoque da análise estática ou dinâmica, sendo a escolha dependente da interpretação da natureza do fenômeno.

As características principais dessas duas abordagens são as seguintes:

1.3.1 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 [3].

Permite uma modelagem mais detalhada do sistema elétrico, que além dos geradores, também a carga pode ser modelada dinamicamente. Portanto tal representação tende a produzir resultados mais precisos para análise de estabilidade de tensão, uma vez que o comportamento da carga tem uma participação decisiva na dinâmica desse evento.

As vantagens da análise dinâmica residem na possibilidade na reprodução fiel da dinâmica da instabilidade de tensão.

As desvantagens dessa análise implicam na necessidade de aquisição de uma quantidade considerável de dados, de longos tempos de simulação, um grande esforço computacional e o não fornecimento direto de informações a respeito da margem e área crítica da estabilidade.

Como o sistema pode se instabilizar a médio termo, ainda que este suporte o regime transitório, pode-se fazer uso de algumas aproximações. Desta forma, obtém-se um simulador de pontos de equilíbrio e a integração das equações diferenciais envolvidas não se faz necessário. Isto reduz substancialmente o esforço computacional associado ao método [17,18,19].

A associação desta técnica com algumas ferramentas estáticas tende a produzir bons resultados.

1.3.2 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. A referência [8] mostra que a análise da estabilidade de tensão por abordagens estáticas ou dinâmicas conduz a resultados semelhantes, se algumas aproximações forem feitas.

A análise estática baseia-se 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.

As vantagens da análise estática são: a capacidade de proporcionar informações a respeito da condição de estabilidade do ponto de equilíbrio considerado, o limite de máximo carregamento, a margem de estabilidade de uma determinada condição operativa, as áreas críticas do sistema, a classificação de contingências críticas [20], e a melhor localização e quantidade necessária de potência reativa para compensação ou obtenção de reserva girante. A riqueza de informações que a análise estática pode

proporcionar, também qualifica esta técnica para a complementação das análises dinâmicas de estabilidade de tensão.

Sua desvantagem reside na desconsideração de características dinâmicas do sistema.

1.4 UM BREVE HISTÓRICO BIBLIOGRÁFICO

Os termos estabilidade de tensão e colapso de tensão nem sempre foram tratados da forma como são hoje. Inicialmente, a análise da estabilidade de tensão era relacionada à sensibilidade da tensão em relação à carga. Classificava-se a degradação das tensões do sistema, em decorrência do bloqueio dos rotores de motores de indução. Hoje, admite-se que a estabilidade de tensão é a propriedade dinâmica de um sistema de se manter em um ponto de operação. Nessa seção, será feita uma citação de diversos trabalhos sobre o tema e procurar-se-á mostrar como o entendimento do assunto tem evoluído. Os aspectos mais notáveis dessa evolução são:

- A associação do limite de estabilidade de tensão a um ponto que separa regiões de operação instável e estável ;
- A associação da estabilidade de tensão, a bifurcações de sistemas não lineares ;
- A associação do colapso de tensão, ao fenômeno que ocorre após à ultrapassagem do limite de estabilidade .

Segundo a referência [21], já no final dos anos 30, autores russos haviam revelado a natureza do colapso de tensão e determinado métodos para análise da estabilidade de carga. Neste livro, o autor afirma que grandes distâncias elétricas entre geradores e cargas do tipo motor de indução podem reduzir a tensão nas barras de carga; onde há um grande aumento de corrente e o correspondente afundamento da tensão.

No ano de 1967 foi definida em [16], a instabilidade de tensão como sendo a situação em que o aumento da admitância da carga provoca uma abrupta diminuição da tensão, tendo o sistema ultrapassado o ponto crítico de transmissão de potência. Ele associa a instabilidade de tensão à sensibilidade de carga. O autor usa corretamente as curvas PV para mostrar que pode haver duas soluções de fluxo de potência para um mesmo valor de carga.

A partir da década de 70, o sistema começou a sofrer um processo de elevação de carga, sem o correspondente aumento da capacidade de transmissão, reduzindo substancialmente a relativa folga com que o sistema de potência estava sendo operado.

Em 1975, os autores [22] associaram o determinante do Jacobiano do fluxo de potência ao limite de estabilidade em regime permanente. A partir de um modelo dinâmico simples de um sistema elétrico e fazendo certas considerações, o determinante do fluxo de potência se iguala ao termo independente da equação característica do sistema, e através disso, serve como indicador da estabilidade estática. Devido ao mal condicionamento da matriz Jacobiana em pontos de equilíbrio próximos ao ponto crítico, foi proposta uma alternativa que equivale a parametrização utilizada no método da continuação, aplicado apenas no final dos anos 80.

Segundo Taylor [8], alguns dos 'black-outs' ocorridos na década de 70 podem estar associados à estabilidade de tensão. Entre alguns incidentes destaca-se o ocorrido na França em 1978. Naquele dia, um aumento inesperado de carga provocou uma redução generalizada na tensão do sistema e desligamentos em cascata. O resultado foi a rejeição de 29 GW de carga e restabelecimento somente após 4 horas.

Em 1982, em [23] foi utilizado um modelo dinâmico de primeira ordem para representar as cargas. A instabilidade de tensão é encarada como um problema de regime

permanente. Entretanto, ainda há forte conotação da associação da sensibilidade da tensão a variações na carga à instabilidade de tensão, que é definida pelos autores como “a habilidade de manter a magnitude das tensões nas cargas dentro de certos limites sob condições de regime permanente”.

Em 1986, a referência [24] associou o problema da instabilidade de tensão, a uma “bifurcação estática” de sistemas dinâmicos não lineares. Os autores caracterizaram o limite da estabilidade como uma “bifurcação estática”, onde o fenômeno de perda de estabilidade estática vista como o máximo defasamento angular entre duas barras e a perda da estabilidade de tensão, são exemplos extremos de um mesmo fenômeno. A partir de então, o ponto de colapso passou a ser reconhecido na literatura como um ponto de bifurcação, uma vez que as condições de transversalidade das bifurcações do tipo sela-nó e Hopf se manifestavam no ponto de colapso. Nota-se, entretanto que com o modelo estático, somente a bifurcação do tipo sela-nó pode ser identificada.

Em 1988, foi proposta a utilização do Mínimo Valor Singular da matriz Jacobiana, como índice da proximidade do limite da estabilidade de tensão [25]. Como o determinante do Jacobiano, o Mínimo Valor Singular torna-se nulo no “ponto de bifurcação” e se comporta de forma decrescente à medida que se aproxima dele (ponto crítico). Entretanto, o Mínimo Valor Singular não é hoje considerado um bom índice como indicador da proximidade do colapso, visto que apresenta um comportamento não previsível, não permitindo a determinação do ponto de colapso. Mais tarde, a referência [38], mostra que os Mínimos Valor Singular e Autovalor sofrem uma variação brusca no ponto de colapso. Portanto, tais métodos tendem a falhar se um fluxo de potência convencional for empregado, uma vez que tal variação brusca só é observada se o programa de fluxo de potência fizer uso da parametrização.

Nos anos 90 seria impraticável detalhar todos os trabalhos importantes enfocando o assunto estabilidade de tensão, devido à grande avalanche de publicações e as características distintas que se apresentam. Em vista disso, procurou-se de uma forma sintética, enfatizar apenas alguns trabalhos importantes.

A referência [27] discute o emprego das matrizes de sensibilidade, onde a sensibilidade das variáveis de estado é obtida através do fluxo de carga para um dado ponto de operação, introduzindo o conceito de controlabilidade na análise do colapso de tensão. Para isso, assume-se que o sistema não sofra nenhuma variação de potência reativa, com a barra referência assumindo todas as variações de perdas elétricas do sistema. Estas considerações permitem reduzir a matriz Jacobiana às derivadas parciais das equações de potência reativa em relação ao nível de tensão. Manipulações neste Jacobiano reduzido fornecem as matrizes de sensibilidade.

A inclusão dos limites de geração de potência reativa na análise por matrizes de sensibilidade é proposta por [28,29]. Esta última referência trata do problema de compensação de potência reativa para melhorar a condição de estabilidade do sistema. Tendo em vista que as equações do sistema de potência não são lineares, as informações obtidas para um ponto de operação podem não ser válidas para outros pontos de operação.

Técnicas de otimização foram empregadas inicialmente por [30], onde a matriz Jacobiana é reduzida às equações de potência reativa, em função do nível de tensão. O incremento de carga é a função objetivo, cargas não otimizadas são restrições de igualdade e limites de geração de potência reativa são as restrições de desigualdade. As referências [31, 32] propõem o método de pontos interiores como técnica de otimização. A primeira referência busca, a partir de um ponto de operação não factível, o ponto de

bifurcação, enquanto a segunda se propõe a achar o ponto máximo de carregamento do sistema.

Outra forma de se determinar a margem de segurança do sistema é através de um método direto. A referência [33] emprega este método que, entretanto pode falhar se os limites de geração de potência reativa forem considerados, uma vez que a estrutura da matriz Jacobiana muda de acordo com o carregamento do sistema. Outra desvantagem é que requer um bom chute inicial para obter a convergência, i.e., necessita do conhecimento de um ponto de operação próximo ao ponto de bifurcação.

O determinante reduzido foi proposto em [34], como índice de estabilidade de tensão. Baseia-se na redução da matriz Jacobiana à dimensão das equações de potências ativa e reativa de cada barra de carga em relação ao ângulo de fase e módulo da tensão. Esta matriz tem dimensão de 2×2 e é calculada para cada barra de carga. A barra de carga associada ao menor determinante é a barra crítica do sistema, naquele ponto de operação. Entretanto, a referência [35] observa que a barra crítica muda à medida que se aumenta o carregamento. Se a barra crítica no ponto de bifurcação for conhecida e os limites de geração forem desprezados, o determinante reduzido calculado para essa barra, fornece um comportamento quadrático em relação ao fator de crescimento de carga. Entretanto, se esses limites são considerados (situação mais realista), descontinuidades podem ser observadas, conforme relatado em [36]. Essa última referência mostra também, que o determinante reduzido tem um comportamento que se aproxima daquele observado para os menores autovalor e valor singular.

O método do vetor tangente foi proposto em [37,38,39], e baseia-se no comportamento do maior vetor tangente em função do crescimento de carga. A grande virtude do método do vetor tangente é a possibilidade da identificação da barra crítica, obtida para

pontos de operação distantes do ponto de bifurcação. A referência [19] mostra uma aplicação do método vetor tangente, aplicado para análise de contingência (perda de linha ou equipamento). Através do monitoramento da norma do vetor tangente do sistema para cada cenário de operação (caso base e contingências), é possível identificar a margem de carga associada a cada situação. Observou-se um comportamento inversamente proporcional da norma do vetor tangente em relação à margem de carga do sistema. Ou seja, quanto maior a norma do vetor tangente para cada situação de contingência, menor é a margem de carga do sistema.

1.5 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS DO FENÔMENO

A ocorrência de alguns incidentes envolvendo problemas de estabilidade de tensão fez com que o tema ganhasse destaque mundial nos últimos anos. Dentre esses eventos, podem-se citar os seguintes [2, 9]:

Japão, 22 de Agosto de 1970

França, 19 de Dezembro de 1978

Dinamarca, 2 de Março de 1979

Bélgica, 4 de Agosto de 1982

Flórida, 2 de Setembro de 1982

Flórida, 26 de Novembro de 1982

Flórida, 28 de Dezembro de 1982

Flórida, 30 de Dezembro de 1982

Suécia, 27 de Dezembro de 1983

Flórida, 17 de Maio de 1985

Checoslováquia, 5 de Julho de 1985

Inglaterra, 20 de Maio de 1986

França, 12 de Janeiro de 1987

Japão, 23 de Julho de 1987

WSCC, 2 de Julho de 1996

1.5.1 Ocorrências no Brasil

1.5.1.1 Ocorrência de Abril de 1997

As ocorrências de instabilidade de tensão ocorridas em abril de 1997 mostram a dependência do sistema aos recursos de potência reativa e a necessidade premente de uma otimização de recursos e controle de tensão. Os fatos mais relevantes ocorreram em abril e novembro de 1997. No mês de abril, uma demanda recorde associada à manutenção de importantes equipamentos de controle de tensão (1 síncrono de Ibiúna, 1 banco de capacitores de 200 Mvar de Tijuco Preto e 208 Mvar em capacitores da ELETROPAULO), tiveram uma contribuição eficaz na ocorrência do colapso de tensão. Somados a isso, a maneira como o sistema vem operando estressado e com carga de potência reativa fortemente influenciada pelas altas temperaturas nos principais centros de carga, desencadeou uma interrupção no suprimento da ordem de 7600 MW no sistema S/ SE/ CO, conforme relatado na referência [40] (Anexo I).

O sistema apresentava um quadro na tomada de rampa de carga (área SP), onde os níveis de tensão em alguns barramentos da área São Paulo e Minas Gerais estavam abaixo das faixas operativas, haja vista que todos os recursos disponíveis já tinham sido esgotados. Fatos que se seguiram, compensador síncrono de Ibiúna passou a operar em sobrecarga, desencadeando reduções acentuadas dos níveis de tensão, nas áreas SP, RJ e MG, considerando ainda, o processo de crescimento da carga. Em seguida ocorreu o desarme de um dos compensadores síncrono de Ibiúna, provocado pela atuação da proteção para sobreexcitação, em virtude da subtensão apresentada. Tal situação agravou as condições de tensão, levando ao bloqueio dos pólos 3 e 4 do elo CC, por atuação das respectivas proteções de mínima tensão DC. Esses desligamentos e mais outros sucessivos, representaram a perda de cerca de 3000 Mw do suprimento de Itaipu 50 Hz ao sistema S/ SE/ CO e de 900 Mvar de compensação de potência reativa, provocando degradação da tensão e frequência. O quadro seguinte foi de desligamentos de diversos equipamentos de controle de tensão, entre compensadores síncronos de Tijuco Preto (300 Mvar - FURNAS), perdas de algumas unidades geradoras, etc.

A situação reinante era de subfrequência e subtensão, onde as ações eram tomadas durante um período de carga ainda crescente, o que dificultou o pronto restabelecimento e normalização da operação do sistema. Entretanto, foram tomadas diversas medidas no sentido de se fazer cortes de carga, com o objetivo de recuperar a frequência, face ao déficit de geração ao qual o sistema estava submetido. O crescimento da carga ora em processo tornou todas as atuações insuficientes. O desligamento automático da termonuclear Angra I e do bipólo remanescente do elo CC com 2386 MW encerrou a seqüência de desligamentos, resultando em frequência da ordem de 58.10 Hz e provocando atuação dos dois estágios do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC).

1.5.1.2 Ocorrência de Novembro de 1997

No dia 13 de Novembro de 1997, a coincidência de temperaturas elevadas na região sudeste também provocou um rápido esgotamento dos recursos de potência reativa e um afundamento generalizado da tensão do sistema. O desligamento automático de uma linha de transmissão em 230 kV com cerca de 160 MW de fluxo provocou um colapso de tensão e rejeição de carga da ordem de 1210 MW na Área Rio de Janeiro/ Espírito Santo.

1.6 PROPOSTAS DO TRABALHO

O acentuado e constante crescimento do consumo de energia elétrica, aliado ao aumento das incertezas na esfera do planejamento da expansão do sistema elétrico elevaram as dificuldades de decisão de novos investimentos em sistemas elétricos e no conseqüente esgotamento de recursos deste sistema no horizonte de operação a curto-prazo.

A operação dos grandes troncos de transmissão com carregamentos próximos dos limites contribuiu para o aumento das perdas de potência reativa, para o esgotamento dos recursos e para os problemas de estabilidade de tensão.

Casos reais de ocorrências no sistema elétrico mostram o mecanismo de colapso de tensão e confirmam as conclusões a respeito da natureza do fenômeno, mostrando que o sistema pode atingir um ponto de colapso através de pequenas perturbações. Tais situações permitem a abordagem estática e o uso de equações de fluxo de carga para modelar alguns comportamentos dinâmicos de um sistema elétrico [9]. Este modelo será empregado neste trabalho.

As perturbações ocorridas no sistema elétrico brasileiro também confirmaram a relação da instabilidade de tensão com o esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema.

Assim surgiu a motivação de se fazer um estudo para adoção de política de corte de carga na Área São Paulo, tendo como resultado a elevação da margem de carga para o sistema elétrico de potência.

A proposta consiste em comparar a política empregada pelas Empresas do setor elétrico da Área São Paulo para corte manual de carga numa situação de necessidade, em relação à técnica do Vetor tangente. O Vetor Tangente indica as barras críticas do sistema e nessas barras serão praticados os mesmos montantes de corte de carga, com o objetivo de se comparar com a política empregada pelas Empresas.

Numa segunda etapa será adotada compensação shunt adicional e verificado o comportamento da margem de carga do sistema, quando esta compensação é feita nos conjuntos de barras críticas ou naquelas barras indicadas pelas Empresas.

Será utilizado um programa de fluxo de potência continuado, acoplado à técnica do Vetor Tangente, como ferramenta [26].

Outro assunto a ser tratado nesse trabalho tem um conteúdo basicamente teórico, cuja motivação é identificar um autovalor que esteja associado à barra crítica e mostrar qual é o comportamento do mesmo, quando se faz incremento de carga no sistema, com considerações de limites de potência reativa dos geradores. A referência [57] mostrou o comportamento do autovalor de interesse, quando não se consideram limites de potência reativa dos geradores.

Este trabalho está dividido em capítulos de forma a apresentar gradualmente as técnicas e estratégias utilizadas. O Capítulo 2 descreve as principais técnicas de análise estática, justificando a escolha do método da continuação para o cálculo da margem de carga do sistema acoplado ao método do vetor tangente como técnica para identificação das barras críticas, onde efetivamente far-se-á cortes de carga.

O Capítulo 3 aborda a identificação e comportamento do autovalor de interesse, quando se faz incremento de carga no sistema, com considerações de limites de potência reativa dos geradores. Apresenta os resultados dos testes, após a identificação do autovalor de interesse e mostra o comportamento do mesmo.

O Capítulo 3 mostra também os resultados e compara as ações de atuação no corte manual de carga com aquelas praticadas pelas Empresas da Área São Paulo objetivando o aumento da margem de carga de um caso real do sistema elétrico brasileiro.

A exposição de uma série de conclusões baseadas nos resultados obtidos e sugestões para desenvolvimentos futuros encerram este trabalho no Capítulo 4.

CAPÍTULO 2

FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESTÁTICA

2.1 INTRODUÇÃO

O capítulo anterior mostrou que a estabilidade de tensão vem sendo encarada sob o ponto de vista estático e dinâmico, sendo a escolha da abordagem basicamente dependente da perturbação estudada.

A análise estática considera que a dinâmica do sistema com influência na estabilidade de tensão sofre variações lentas, permitindo a simplificação do modelo dinâmico, representado através do conjunto de equações diferenciais. Portanto, essas equações podem ser reduzidas a um conjunto de equações puramente algébricas para cada ponto de equilíbrio, considerando-se o modelo de sistema utilizado nos estudos de fluxo de potência. Adotando esse modelo, é possível determinar num instante qualquer, como a tensão irá responder a uma pequena mudança no sistema, como, por exemplo, a transição entre períodos de carga.

Para pequenos distúrbios, as análises que utilizam técnicas de linearização trazem valiosas informações sobre o mecanismo da instabilidade de tensão, como informações a respeito da condição de estabilidade do ponto de equilíbrio considerado, o limite de máximo carregamento, a margem de estabilidade de uma determinada condição operativa, as áreas críticas do sistema, a classificação de contingências críticas, e a melhor localização e quantidade necessária para compensação de potência reativa.

As ocorrências de colapso de tensão no sistema elétrico brasileiro mostraram o quão é importante o conhecimento da distância entre um ponto de operação e o ponto de máximo carregamento do sistema. Visto que o colapso de tensão tem sido reconhecido como um fenômeno que se inicia localmente e se espalha pela vizinhança [5,15], a identificação de áreas ou barras críticas do sistema, tem importância fundamental para a otimização das ações de controle do fenômeno.

A distância entre um ponto de operação conhecido e o ponto de máximo carregamento do sistema será denominada neste trabalho como “*margem de carga*”; as barras cujas variações de carga produzem maiores variações de tensão no ponto de colapso, serão referidas como “*barras críticas*”.

Este capítulo apresentará diversos métodos para identificação do ponto de colapso e a teoria em que se baseiam as técnicas utilizadas neste trabalho para o cálculo da *margem de carga* (método da continuação) e das *barras críticas* (método do Vetor Tangente), as quais serão utilizadas para desenvolvimentos posteriores.

2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE ESTÁTICA

O cálculo da margem de carga entre o ponto de operação conhecido e o ponto de colapso de tensão implica no conhecimento de um método que identifique o ponto de colapso de tensão. A teoria da bifurcação tem sido reconhecida na literatura como uma ferramenta importante para a análise do fenômeno, muito embora não se constitua um pré-requisito para o entendimento do problema.

2.2.1 Teoria da Bifurcação

O estudo do comportamento de um sistema de equações não lineares pode ser obtido através da teoria da bifurcação [41]. De todos os tipos de bifurcação, as bifurcações de Sela-nó e Hopf são as mais comuns em estudos da estabilidade da tensão. Se um modelo dinâmico de sistema é empregado, ambos os tipos podem ser detectados. Entretanto, se o modelo de fluxo de carga (estático) é escolhido, somente a bifurcação de Sela-nó é possível de ser encontrada [33]. A bifurcação de Hopf é caracterizada pela existência de um par de autovalores puramente imaginários, enquanto que a bifurcação de Sela-nó é caracterizada pela existência de um autovalor real nulo (matriz Jacobiana singular). Esta importante característica tem sido largamente explorada na literatura. As técnicas citadas nas seções subseqüentes reconhecem o ponto de colapso de tensão como um ponto de bifurcação de Sela-nó.

2.2.1.1 Características da bifurcação Sela-nó

Aplicando o teorema de variedade de centro, o sistema multidimensional, torna-se:

$$\dot{x} = \lambda - x^2 \quad (2.1)$$

onde λ é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro.

Para $\lambda > 0$, tem-se:

- Duas soluções para $x = \pm\sqrt{\lambda}$
- Jacobiano = $-2x$

O ponto $(0,0)$ é não hiperbólico, pois $D_x f = 0$. Esse ponto não possui autovalores com sinais invertidos. Portanto, para um caso bidimensional, o produto dos dois autovalores deve ser menor que zero.

Para $\lambda < 0$, tem-se :

- Não existe solução para x

O diagrama de bifurcação é representado abaixo:

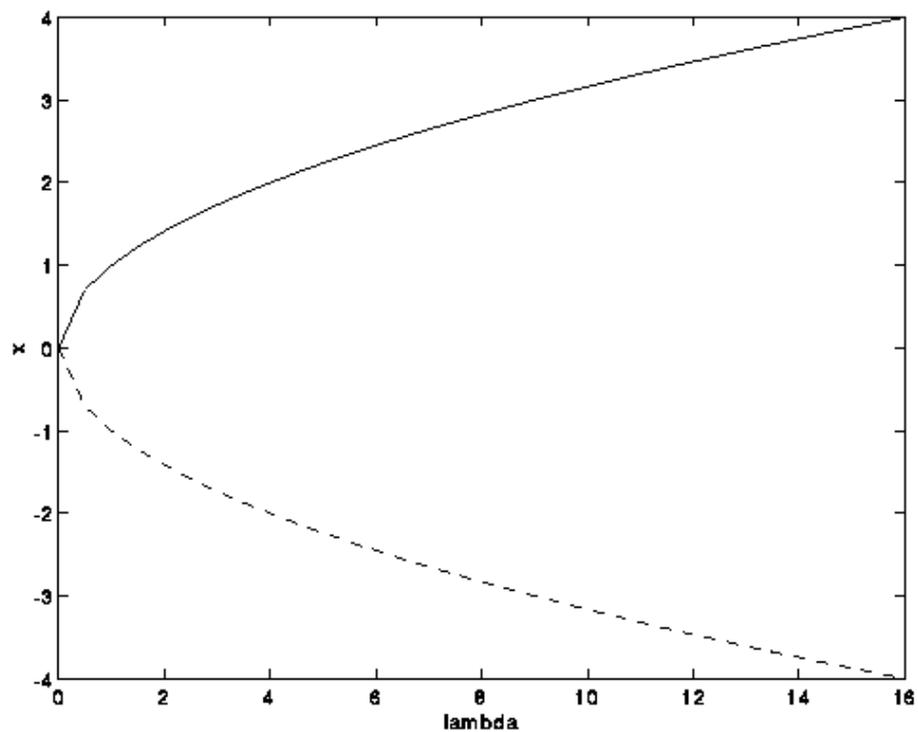


Figura 2.1 Diagrama de Bifurcação de uma Sela-nó

A análise do Jacobiano identifica a estabilidade de cada ramo:

$$D_x f = -2x \quad \begin{cases} x > 0 & \text{estável, pois } D_x f < 0. \\ x < 0 & \text{instável, pois } D_x f > 0. \end{cases} \quad (2.2)$$

Portanto, o ramo contínuo ($x > 0$) é estável, enquanto o ramo tracejado é instável. As seguintes características deste tipo de bifurcação podem ser identificadas:

- a) Duas soluções tornam-se única no ponto de bifurcação.
- b) Um autovalor real nulo é identificado.
- c) Após o ponto de bifurcação as soluções desaparecem.

Este tipo de bifurcação é genérico, i.e., é suposto estar presente na maioria dos sistemas dinâmicos.

Conhecendo o comportamento local de cada bifurcação, podem-se identificar as condições de transversalidade de cada uma. A bifurcação Sela-nó tem um autovalor zero, com autovetor à direita v e à esquerda w , tal que:

$$D_x f_0^T w = D_x f_0 v = 0 \quad (2.3)$$

$$w^T \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Big|_0 \neq 0, \text{ porque } \frac{\partial f}{\partial \lambda} = 1 \quad (2.4)$$

$$w^T [D_x^2 f \Big|_0 v] \neq 0, \text{ porque } \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = -2 \quad (2.5)$$

2.2.1.2 Sela-nó em Sistemas de Potência

Nesta seção o sistema simples de duas barras mostrado na Figura 2.2 é utilizado para a análise de colapso de tensão. O modelo de fluxo de carga empregado é baseado nas considerações desenvolvidas nas referências [9,42]. A carga é modelada como potências ativa e reativa constantes e deve sempre ser suprida. Isto implica que nenhum limite de geração será considerado e a linha de transmissão é o único fator limitador.

A impedância Z da linha de transmissão é dada por 0,21 pu com ângulo β de 75° . A tensão na barra de carga é desconhecida, enquanto a tensão na barra de geração é fixada em 1,0 pu com ângulo δ_1 de 0° .

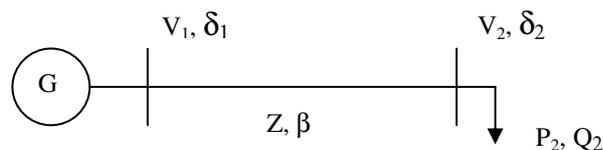


Figura 2.2 Sistema de 2 Barras

No Anexo II, encontram-se o equacionamento utilizado para se obter através do programa MATLAB [43], as curvas apresentadas na figura 2.2.

As equações de fluxo de carga são representadas pelas equações da barra de carga abaixo:

$$P_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} \cos(\delta_2 - \delta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \cos(\beta) \quad (2.6)$$

$$Q_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} \sin(\delta_2 - \delta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \sin(\beta) \quad (2.7)$$

Portanto, para cada valor de carga (P_2, Q_2) deseja-se determinar os valores de magnitude de tensão e ângulo de fase na barra de carga, uma vez que todas as outras variáveis são conhecidas. Note nas equações acima que para cada valor conhecido de ângulo de fase δ_2 , dois valores de magnitude de tensão V_2 são obtidos. Se o ângulo de fase δ_2 variar nas equações acima, dois gráficos de V_2 em função de δ_2 podem ser obtidos, um para P_2 e outro para Q_2 . Para uma dada carga (P_2, Q_2), portanto, o ponto de operação é dado pela interseção destas curvas. A Figura 2.2 mostra o gráfico de V_2 em função de δ_2 para três situações de carga distintas; $P_{21} < P_{22} < P_{23}$ e $Q_{21} < Q_{22} < Q_{23}$. O fator de potência é mantido constante para os três níveis de carga.

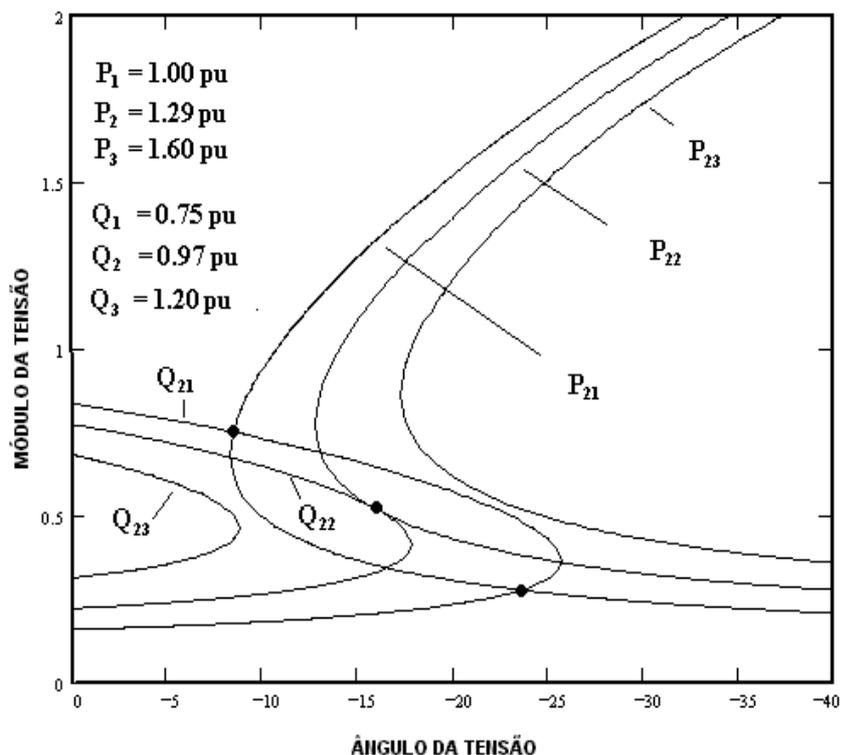


Figura 2.3 Carregamentos no Sistema de 2 Barras

Note que para a condição de carga inicial (P_{21}, Q_{21}) , duas soluções são obtidas; uma no ramo superior e outra no ramo inferior. A carga pode ser aumentada até uma condição tal em que somente uma solução possa ser determinada, como mostrado para a carga (P_{22}, Q_{22}) . Este ponto, indicado na figura, é de extrema importância para a análise de estabilidade de tensão. A partir dele, não existe solução para nenhum valor de carga, como observado para a carga (P_{23}, Q_{23}) . A carga (P_{22}, Q_{22}) representa o máximo carregamento possível de ser transmitido entre as Barras 1 e 2.

Pela Figura 2.2, a carga (P_{22}, Q_{22}) representa uma fronteira entre os ramos superior e inferior. O fato de existir somente uma solução implica que os vetores gradiente ∇P_2 e ∇Q_2 estão alinhados. Portanto, pode-se escrever:

$$\nabla P_{22} - \mu \nabla Q_{22} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P_{22}}{\partial \delta_2} - \mu \frac{\partial Q_{22}}{\partial \delta_2} = 0 \quad \text{e} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial P_{22}}{\partial V_2} - \mu \frac{\partial Q_{22}}{\partial V_2} = 0 \quad (2.10)$$

Onde:

μ é um escalar

A solução das equações acima para μ fornece:

$$\frac{\partial P_{22}}{\partial \delta_2} \frac{\partial Q_{22}}{\partial V_2} - \frac{\partial P_{22}}{\partial V_2} \frac{\partial Q_{22}}{\partial \delta_2} = 0 \quad (2.11)$$

A equação (2.11) indica que o Jacobiano do fluxo de carga para o sistema da Figura 2.2 é singular para a carga (P_{22}, Q_{22}) , implicando num autovalor nulo. As condições de transversalidade de bifurcações do tipo Sela-nó [41] são satisfeitas na Figura 2.3:

Duas soluções se aproximam em função de uma variação paramétrica (aumento de carga);

No ponto de solução única, um autovalor real nulo é identificado;

Não existe solução para uma nova variação paramétrica.

A satisfação das condições acima caracterizam o ponto (P_{22}, Q_{22}) como um ponto de Sela-nó. Como a matriz Jacobiana do fluxo de carga no ponto de colapso é singular, alguns métodos buscam a determinação do ponto de colapso através da identificação da singularidade desta matriz. Estes métodos serão analisados na próxima seção.

2.2.2 Análise pelos Mínimos Autovalor e Valor Singular

Consiste em para cada ponto de operação, calcular os menores autovalor e valor singular da matriz Jacobiana. As referências [44,45] e [46,47] tratam da análise da estabilidade de tensão por valores singulares e autovalores, respectivamente. À medida que se aumenta o carregamento do sistema, o menor autovalor e valor singular diminuem, até tornarem-se nulos, quando o ponto de Sela-nó é identificado. A referência [37] mostra que esses índices sofrem uma variação brusca no ponto de bifurcação. Portanto, tais métodos tendem a falhar, se um programa de fluxo de potência

convencional for empregado, uma vez que tal variação brusca só é observada se o programa fizer uso da parametrização. Para uma matriz diagonalizável qualquer, todas as informações fornecidas pelos autovalores podem também ser obtidas pelos valores singulares e vice-versa.

2.2.2.1 *Decomposição de uma Matriz por Autovalores e Valores Singulares*

A decomposição em autovalores da matriz Jacobiana J é dada por:

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

X: Matriz de Autovetores à Direita

Y: Matriz de Autovetores à Esquerda

Λ : Matriz Diagonal, cujos elementos são autovalores de J

O menor autovalor torna-se nulo quando o sistema alcança o ponto de bifurcação. Sendo assim, o acompanhamento de sua evolução, à medida que a carga aumenta, é uma forma de se detectar a proximidade do ponto de colapso de tensão. Todavia, nem sempre o *menor autovalor* determinado a uma certa distância do ponto crítico é aquele que realmente tornar-se-á nulo, como mostrado em [36,37].

2.2.2.2 *Decomposição de uma Matriz por Valores Singulares*

A decomposição por valores singulares de uma matriz é um método de decomposição ortogonal. Seja a matriz A , real, quadrada, de dimensão $n \times n$, a decomposição por valores singulares é expressa como:

$$A = U \Sigma V^T \quad (2.13)$$

onde U e V são matrizes ortonormais de dimensão $n \times n$, e Σ é uma matriz diagonal com os valores singulares de A , que de acordo com a referência [45], pode ser aplicada à matriz jacobiana do fluxo de potência.

Portanto, para uma matriz simétrica, $U = V$, i.e., os vetores singulares à esquerda e à direita são iguais. Conseqüentemente, os autovalores são iguais aos valores singulares.

O menor valor singular σ_n , indica o quão perto da singularidade está a matriz Jacobiana. Quando se tem o menor valor singular igual a zero, não se pode obter nenhuma solução do fluxo de carga. Deste modo, próximo ao ponto crítico.

O inverso do menor valor singular σ_n^{-1} será então, sob o ponto de vista de um pequeno distúrbio, o indicador da maior variação das variáveis de estado.

2.2.2.3 *Interpretação dos Autovalores/ Valores Singulares*

Apesar do cálculo dos autovalores e valores singulares sinalizarem o ponto de colapso, estes índices não são suficientes na localização da área crítica, havendo necessidade de serem considerados os autovetores associados aos autovalores/valores singulares.

Algumas observações podem ser concluídas através da decomposição da matriz Jacobiana em autovalores. O autovetor à direita está associado à forma como as variáveis de estado irão responder às variações na injeção de potências ativa e reativa, ou seja, está relacionado à sensibilidade de tensão e ângulo. Os autovetores à esquerda estão relacionados à sensibilidade do sistema às injeções de potência ativa e reativa.

De maneira semelhante aos autovalores, pode-se fazer as seguintes interpretações com relação aos Valores Singulares:

- O menor valor singular é um indicador da proximidade do limite de estabilidade em regime permanente;
- O vetor singular à direita está associado ao menor valor singular, indica a sensibilidade das tensões e ângulo;
- O vetor singular à esquerda associado ao menor valor singular, está relacionado à sensibilidade do sistema às injeções de potências ativa e reativa.

Algumas referências utilizam a matriz Jacobiana, reduzida às derivadas parciais das equações de potência reativa, em relação ao módulo de tensão. Todas as outras derivadas são consideradas implicitamente, como será mostrado abaixo. A matriz J_{QV} é determinada da seguinte maneira [44, 45]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Sendo: $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ matriz Jacobiana do fluxo de carga e assumindo que o sistema não tenha variação de potência ativa e considera-se apenas que haja incrementos de potência reativa, tem-se :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \theta_g \\ \theta_l \end{bmatrix} + [B][\Delta V_l] \quad (2.16)$$

$$[\Delta Q_l] = [C] \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \end{bmatrix} + [D][\Delta V_l] \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \end{bmatrix} = - [A]^{-1} [B][\Delta V_l] \quad (2.18)$$

Fazendo substituições, tem-se:

$$[\Delta Q_l] = [J_{QV}][\Delta V_l] \quad (2.19)$$

A referência [36] mostra que a matriz Jacobiana reduzida é quase simétrica. Portanto, a decomposição por autovalores ou valores singulares é facilmente obtida.

A referência [36] faz uma comparação entre as técnicas descritas até então. Os testes realizados consistiam em variar a carga do sistema IEEE-300 barras até que o ponto de colapso de tensão fosse obtido, considerando os limites de potência reativa dos geradores. Com a ajuda do fluxo de carga continuado, fez-se a identificação do ponto de bifurcação, onde a margem de carga para esse sistema, considerando limites de potência reativa é:

$$\Delta\lambda=0,00458 \quad (2.20)$$

Para cada ponto de operação foram 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} . 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:

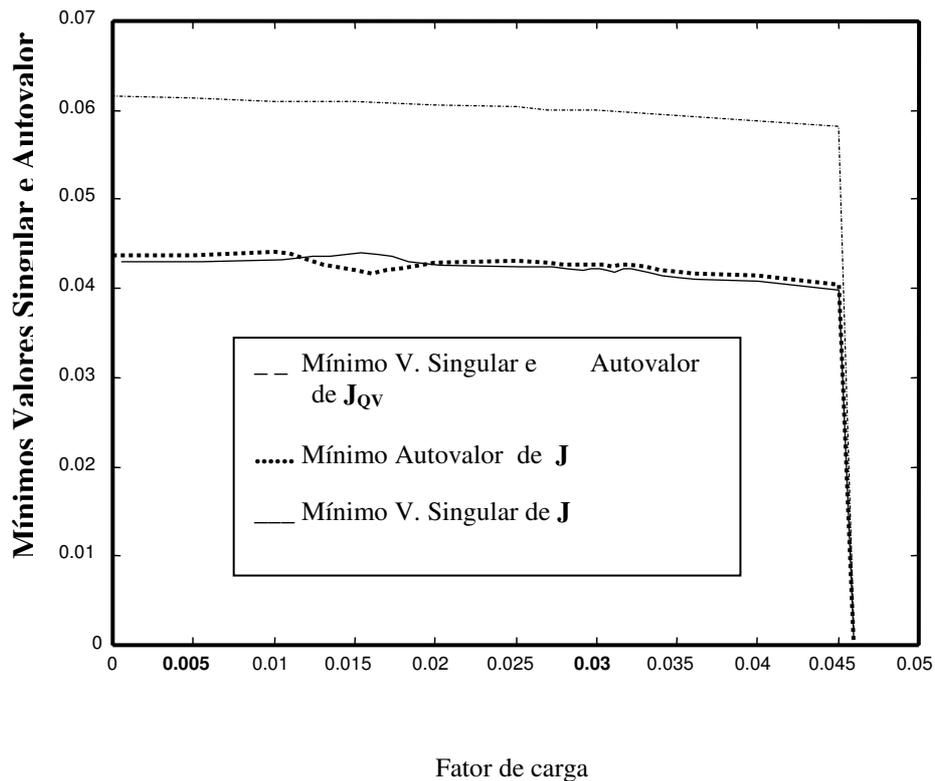


Figura 2.4 Mín. V. Singular e Mín. Autovalor Absoluto

2.2.3 Análise pelo Determinante Reduzido

Seja o sistema linearizado de equações representado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

A matriz Jacobiana J pode ser reordenada, de tal modo que as linhas e as colunas associadas às equações da barra l sejam trocadas com as duas últimas linhas e colunas, obtendo:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Assuma que para um dado ponto de operação, o sistema não tenha nenhuma variação de carga ou geração, exceto na barra l , que tem uma variação de carga infinitesimal. Como nenhum dos geradores experimentam variação de geração, a barra referência deve absorver o acréscimo de potência de potência na barra l e as diferenças de perdas nas linhas. Estas considerações permitem que a matriz Jacobiana possa ser decomposta como:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

De onde obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = \left[[D] - [C][A]^{-1}[B] \right] \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

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 (2.25) pode ser reduzida a :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = [D_{\ell\ell}] \begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

onde

$$D_{\ell\ell} = D - CA^{-1}B \quad (2.27)$$

No ponto de colapso, pequenas variações de carga produzem grandes variações de tensão e ângulo. Isto é refletido em:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} = [D_{\ell\ell}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

De acordo com a fórmula de Schur [48], o determinante da matriz Jacobiana da equação (2.28) pode ser dado por:

$$\det(J) = \det(D_{\ell\ell}) \det(A) \quad (2.29)$$

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 $D_{\ell\ell}$ torna-se nulo no ponto de colapso. A matriz $D_{\ell\ell}$, de dimensão 2 x 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.

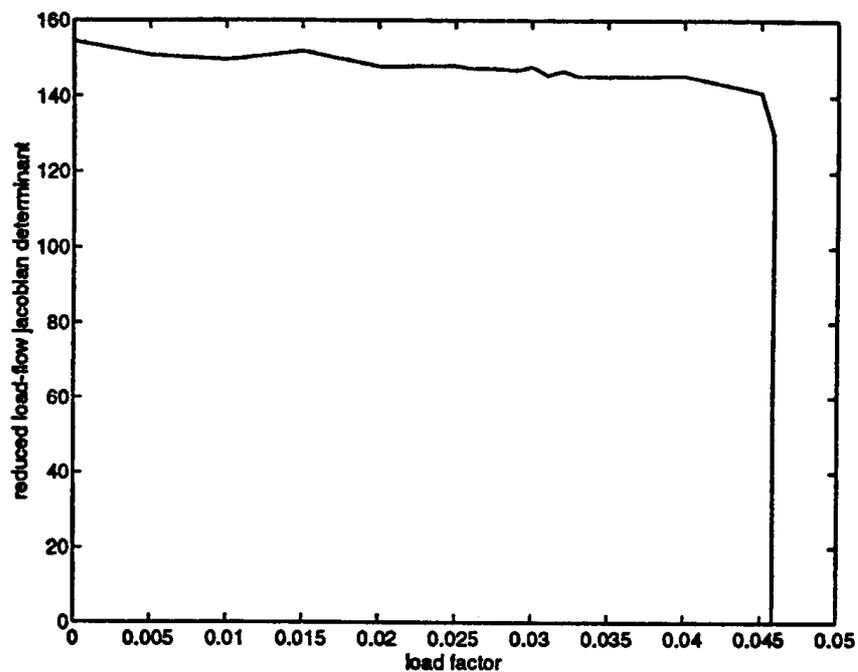


Figura.2.5 Determinante do Jacobiano reduzido $D_{\ell\ell}$
avaliado para uma barra não-crítica (192)

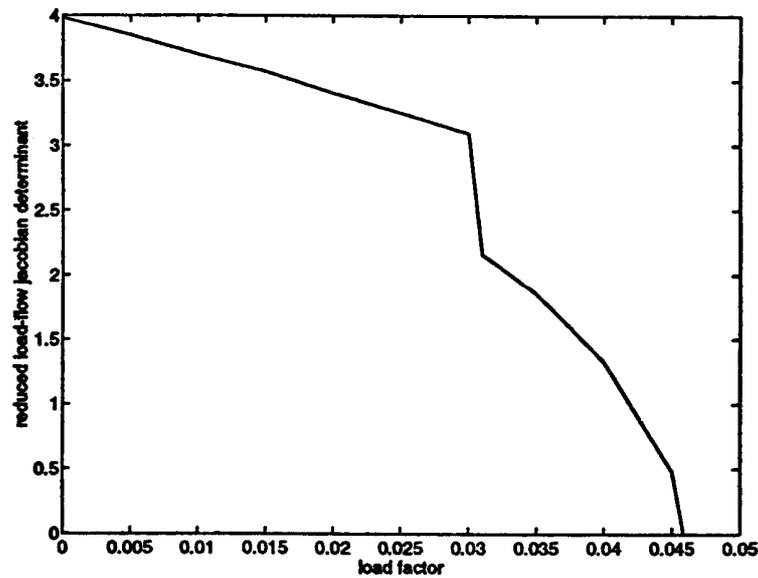


Figura 2.6 Determinante do Jacobiano reduzido $D_{\ell\ell}$
avaliado para a barra crítica (526)

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6, as principais conclusões relatadas em [36] são as seguintes:

A decomposição da matriz Jacobiana reduzida J_{QV} por valores singulares ou autovalores proporciona resultados idênticos, haja vista ser essa matriz quase simétrica [36].

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, nenhum desses valores pode ser usado como um índice de proximidade do colapso de tensão, devido à súbita variação nesses índices quando o sistema se aproxima do ponto de bifurcação.

O determinante da matriz Jacobiana reduzida $D_{\ell\ell}$ 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.

Pode-se concluir que tais técnicas não permitem que a partir de um ponto de operação conhecido se estime o ponto de colapso.

2.3 MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

De acordo com o gráfico da Figura 2.2, tendo em vista as condições de transversalidade de um Sela-nó, o Jacobiano do fluxo de carga torna-se singular no ponto de colapso, i.e., esta matriz não é inversível. Conseqüentemente, a matriz Jacobiana torna-se mal condicionada, à medida que o sistema aproxima-se do ponto de Sela-nó e o sistema de equações lineares pode não ter solução. Desta maneira, o modelo de fluxo de carga convencional pode não ser suficiente para a determinação do ponto de colapso. Este problema pode ser superado pelo método da continuação.

2.3.1 Formulação Matemática

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

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (2.30)$$

Onde:

λ É o parâmetro que conduz o sistema de um ponto de equilíbrio para outro, usualmente um fator aplicado à carga total.

\mathcal{X} Representa as variáveis de estado (módulo e ângulo das tensões nodais)

Podem-se caracterizar os seguintes elementos básicos utilizados nesse método:

Passo Previsor

Controle do tamanho do passo

Parametrização

Passo Corretor

2.3.2 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 (2.30) em relação a λ obtém-se a seguinte equação linear:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|^i \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|^i + \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|^i = 0 \quad (2.31)$$

$$\text{ou } \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|^i = - \left(\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|^i \right)^{-1} \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|^i \quad (2.32)$$

Onde:

$\frac{dx}{d\lambda}$ É o vetor tangente

$\frac{\partial f}{\partial x}$ 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 menores são mais apropriados.

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

$$\Delta\lambda^i = \frac{k}{\left\| \frac{dx}{d\lambda} \right\|^i} \quad (2.33)$$

onde:

k é uma constante e $\left\| \frac{dx}{d\lambda} \right\|^i$ é a norma Euclidiana

A referência [49] relata bons resultados para $k = 1$.

A equação (2.33) resulta na redução do tamanho do passo à medida que o sistema aproxima-se do ponto crítico, uma vez que a magnitude do vetor tangente aumenta quando o sistema se aproxima desse ponto.

Definida a variação do parâmetro a partir da equação (2.33), a direção desejada para o vetor das variáveis de estado será dada por:

$$\Delta x^i = \Delta \lambda^i \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|^i \quad (2.34)$$

E o ponto estimado como próxima solução será:

$$\left(\bar{x}^{i+1}, \bar{\lambda}^{i+1} \right) = \left(x^i + \Delta x^i, \lambda^i + \Delta \lambda^i \right) \quad (2.35)$$

Entretanto, ainda o problema de mau condicionamento da matriz Jacobiana do fluxo de potência não foi resolvido, trazendo problemas para o cálculo de vetor tangente, este também dependente da inversão daquela matriz (equação 2.32). A referência [33] mostra que o vetor tangente converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo, enquanto que a referência [52] mostra que a maior componente no autovetor à direita indica a variável mais sensível no ponto de singularidade. Portanto, a parametrização é feita através da transformação em parâmetro, da variável de estado que apresentar maior variação relativa no último ponto calculado, isto é:

$$p \leftarrow \max \left\{ \left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right|^i, \left| \frac{\Delta x_2}{x_2} \right|^i, \dots, \left| \frac{\Delta x_n}{x_n} \right|^i, \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right|^i \right\} \quad (2.36)$$

A parametrização é a responsável pela remoção da singularidade da matriz Jacobiana.

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; 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.

2.3.3 Corretor

Encontra a solução (x_2, λ_2) , a partir de $(x_1 + \Delta x_1, \lambda_1 + \Delta\lambda_1)$. A solução é obtida resolvendo: um plano perpendicular à direção prevista, isto é:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (2.37)$$

$$\rho(x, \lambda) = 0 \quad (2.38)$$

A segunda equação acima é uma equação extra e pode ser obtida através da interseção perpendicular entre os vetores previsor e corretor, obtendo:

$$\rho(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta \lambda_1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x - x_1 - \Delta x_1 \\ \lambda - \lambda_1 - \Delta \lambda_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.39)$$

Iniciando o processo em $(x_1 + \Delta x_1, \lambda_1 + \Delta\lambda_1)$, esta solução converge para (x_2, λ_2) .

2.3.4 Síntese do Método da Continuação

A Figura 2.3. 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}) :

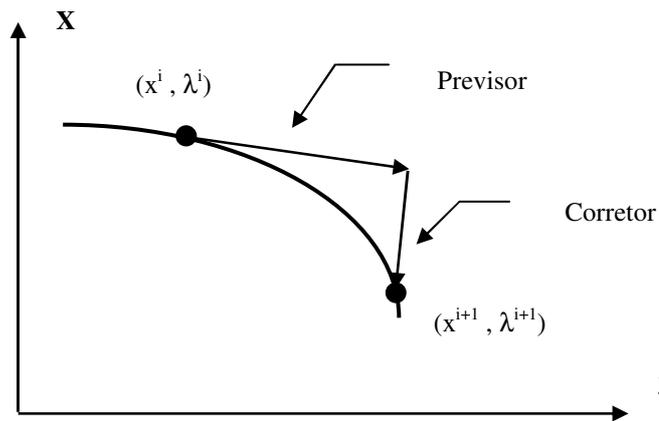


Figura 2.7 Processo do Método da Continuação

O resultado de repetidas execuções dos passos previsor e corretor é um conjunto de pontos que formam o diagrama de bifurcação, onde a margem de carga será dada pela parcela de carregamento que ao ser adicionada à carga inicial fará com que o sistema atinja o ponto crítico (“nariz” da curva P-V).

A robustez e os resultados precisos fornecidos pelo método da continuação fazem com que essa técnica seja usada em diversas referências [49,50,51].

A desvantagem consiste no alto esforço computacional exigido para sistemas de grande porte.

2.3.5 Método do Vetor Tangente

Na seção anterior foi mostradas a determinação do vetor tangente e sua aplicação no método da continuação.

O método do vetor tangente foi proposto em [15,38,39] e baseia-se no comportamento do maior componente do vetor tangente. A referência [33] mostra que este vetor converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo. Sabe-se também que,

no ponto de colapso, pequenas variações de carga produzem grandes variações de tensão. Como consequência, o vetor tangente tem componentes infinitos e a inversa de cada componente tende a zero. Portanto, pode ser de interesse a monitoração do vetor tangente em função do carregamento do sistema. O vetor tangente é obtido pelo produto da inversa do Jacobiano pelo vetor de carga inicial de cada barra de carga.

Na equação (2.32) foi visto que o vetor tangente mostra como as variáveis de estado se modificam com o carregamento de um sistema. Pode-se observar que o vetor tangente é obtido pelo produto da inversa da matriz Jacobiana pelo vetor de carga/ geração inicial. Desta forma, o cálculo deste vetor é facilmente incorporado em qualquer programa de fluxo de carga convencional e sua facilidade de obtenção constitui-se em uma grande vantagem em relação aos métodos previamente descritos.

Outra vantagem deste método refere-se à identificação da barra crítica, obtida para pontos de operação diferentes do ponto de bifurcação. 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.

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 e descontinuidades.

A referência [39] estudou o comportamento do vetor tangente como ferramenta de identificação da barra crítica. Nesta referência é mostrado que este vetor identifica estas variáveis (barras) para pontos de operação distantes do ponto de colapso de tensão, qualidade até então inédita entre as técnicas estudadas. É mostrado que, embora o vetor

tangente convirja para o autovetor à direita no ponto crítico, estas técnicas proporcionam diferentes informações durante o processo de carregamento do sistema.

Isso pode ser observado na Figura 3.4, 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 em 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.

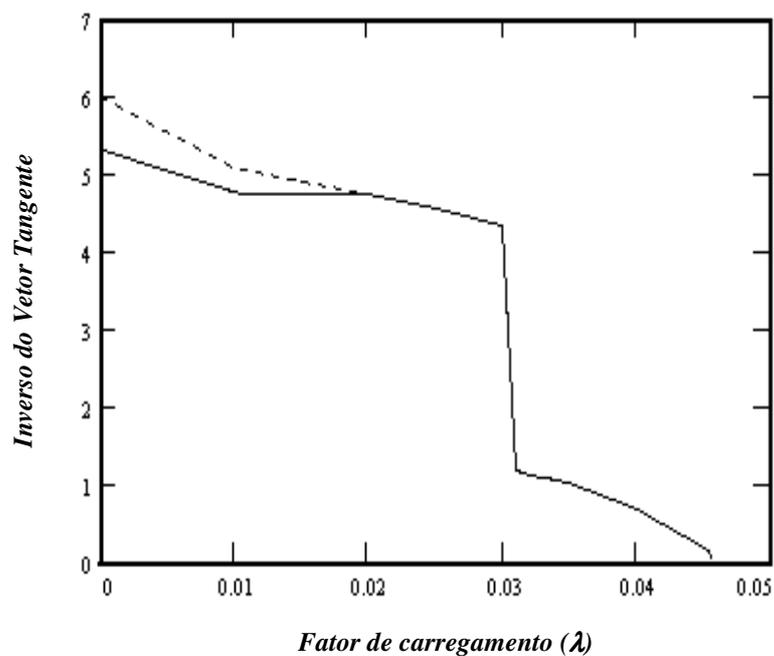


Figura 2.8 Componentes do Vetor Tangente

Esses valores foram obtidos através de uma rotina desenvolvida em MATLAB [43].

Também pode ser observado na Figura 2.8 que o vetor tangente apresenta comportamento similar àquele obtido para o determinante da matriz Jacobiana reduzida $D_{\ell\ell}$ avaliado para a barra crítica, apresentado na Figura 2.3.

A desvantagem deste método é que seu comportamento em função do aumento de carga produz a mesma descontinuidade observada no comportamento do determinante reduzido, desqualificando este método, na determinação do ponto de bifurcação.

Este problema é superado pela técnica da extrapolação quadrática [39], que a partir de dois pontos de operação conhecidos busca o ponto de bifurcação, através de tentativa e erro, baseado no comportamento do vetor tangente como função do carregamento do sistema.

A referência [39] mostra que a aplicação do método do vetor tangente através da extrapolação quadrática apresenta resultados tão precisos quanto os obtidos pelo método da continuação. A aplicação do método em cálculos da margem de carga é justificada em função do baixo esforço computacional envolvido (em torno de 1/3 do tempo requerido pelo método da continuação), tornando-o atraente principalmente em sistemas de grande porte e em aplicações de tempo real.

O método da extrapolação quadrática não será adotado neste trabalho em virtude de ainda não existirem no mercado programas utilizando este método em sistemas de grande porte. Para o cálculo da margem de carga será adotado neste trabalho o método da continuação, programa LFLOW [53] e incorporando a técnica do Vetor Tangente o programa ANAREDE [26].

A Figura 2.9 proporciona uma síntese do processo de fluxo de potência através do método da continuação, em forma de fluxograma.

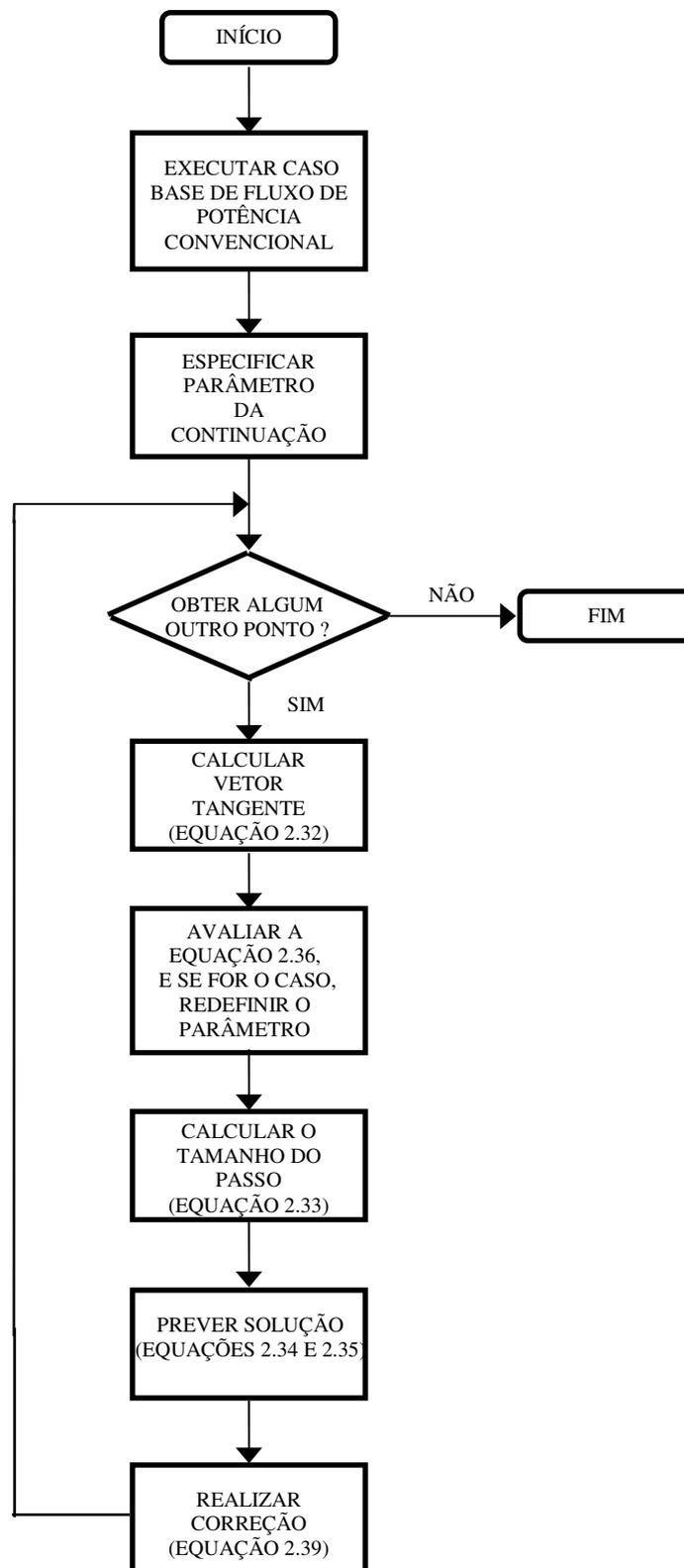


Figura 2.9 Um fluxograma do fluxo de potência através do método da continuação

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 2.1. 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.

Tabela 2.1 Identificação da barra crítica

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

Fica claro, da Tabela 2.1, que o vetor tangente identifica corretamente a barra crítica 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.

2.4 CONCLUSÃO

Além dos métodos citados, existem outros índices propostos na literatura, como por exemplo, da otimização e partição de redes.

O método da otimização foi empregado inicialmente em [30], onde a matriz Jacobiana é reduzida às equações de potência reativa em função do nível de tensão. Na proposição do problema, o incremento de carga é a função objetivo, cargas não otimizadas são restrições de igualdade e limites de geração de potência reativa são restrições de desigualdade. É assumido que a carga tem um fator de potência constante durante o processo de carregamento do sistema. As referências [31,32] propõem o método de pontos interiores como técnica de otimização. A primeira referência busca, a partir de um ponto de operação não factível, o ponto de bifurcação, enquanto a segunda propõe a achar o ponto máximo de carregamento do sistema.

Os métodos de partição de redes têm por objetivo a redução do esforço computacional requerido pelo método da continuação para determinação do ponto de bifurcação.

Os métodos de partição de redes reduzem a dimensão do sistema substancialmente e a partir do subsistema de interesse, aplica-se qualquer das técnicas previamente discutidas. Estes métodos de partição de redes têm como desvantagem o fato de que a determinação imprecisa dos subsistemas, pode levar a resultados bem distantes do real. Além do mais, uma partição de redes avaliada em relação ao primeiro ponto de operação pode induzir a erros grosseiros, uma vez que uma área não considerada crítica pode vir a ser crítica durante o processo de colapso de tensão.

Todavia, a maioria dos índices citados até aqui não fornece um comportamento previsível, como pôde ser constatado nesse capítulo, através de testes envolvendo os principais desses métodos.

Portanto, a metodologia empregada nesse trabalho para a ação de corte de carga, como medida preventiva ao colapso de tensão será o vetor tangente, associado ao programa de fluxo de carga, visto apresentar comportamento que permita a determinação prévia da barra/ área crítica, conforme descrito em seções anteriores.

CAPÍTULO 3

ASPECTOS TEÓRICOS E RESULTADOS

3.1 CONCLUSÃO

A expansão dos Sistemas Elétricos de Potência criou sistemas cada vez maiores e mais complexos, interligados a outros sistemas também grandes, todos devidamente estáveis do ponto de vista angular entre máquinas, tanto em regime normal de operação, quanto frente às piores emergências. Começou então, a surgir de forma acentuada e freqüente, o fenômeno da instabilidade de tensão ou também chamado de “instabilidade da carga”, sendo que alguns deles descritos no Capítulo 1.

O fenômeno já conhecido na Área Rio de Janeiro/ Espírito Santo [40], região com pouca geração local (16% da carga de 6.000 Mw) e radial, vem agora apresentando ocorrências graves de instabilidade de tensão no Sistema da Área São Paulo, formada por uma rede de transmissão malhada e com um grande parque gerador.

Formaram-se numerosos grupos de trabalho e iniciaram estudos, no intuito de melhor compreender o fenômeno da instabilidade de tensão, definir critérios e procedimentos e em particular, evitar a repetição sistemática de ocorrências graves de instabilidade de tensão no Sistema Interligado Sul/ Sudeste Brasileiro [58].

Este trabalho aborda dois focos distintos, sendo um teórico e outro prático.

No capítulo anterior fez-se uma descrição abrangente das várias ferramentas para análise estática, e as principais características de cada uma delas. Comparações foram feitas entre vários métodos para análise estática de estabilidade até então descritos.

Em termos teóricos, os índices apresentados no capítulo anterior são matematicamente discutidos. É mostrado o quanto esses índices tendem a fornecer os mesmos resultados.

Justifica-se que o método do Vetor Tangente reúne as maiores vantagens na identificação da barra/área crítica de um sistema e também possibilita a determinação da margem de carga, através da extrapolação quadrática ou mesmo através do método continuado, usando o vetor tangente.

A abordagem prática consiste na determinação de ações seletivas de corte de carga na área São Paulo, usando o vetor tangente, onde através de tais ações deseja-se observar o quão se ganha em termos de margem de carga no sistema. Serão propostas algumas ações de controle, na Área São Paulo, onde serão analisados os benefícios de tais ações.

O primeiro assunto a ser tratado nesse trabalho tem um conteúdo basicamente teórico, cuja motivação é identificar um autovalor que esteja associado à barra crítica e mostrar qual é o comportamento do mesmo, quando se faz incremento de carga no sistema, com considerações de limites de potência reativa dos geradores. A referência [57] mostrou o comportamento do autovalor de interesse, quando não se consideram limites de potência reativa dos geradores.

3.2 IDENTIFICAÇÃO DO AUTOVALOR DE INTERESSE COM CONSIDERAÇÕES DE LIMITES DE POTÊNCIA REATIVA

3.2.1 Teorema da variedade de centro

Seja o conjunto de equações bidimensionais abaixo:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + f(x, y) \quad (3.1)$$

$$\frac{dy}{dt} = By + g(x, y)$$

Onde A e B são matrizes diagonais, cujos autovalores têm zero e parte real negativa. É assumido, que o sistema de equações não tenha autovalores com parte real positiva. As funções $f(x, y)$ e $g(x, y)$ têm uma expansão de Taylor na vizinhança do ponto crítico $(0, 0)$. No ponto crítico, $y(x) = h(x)$ e $h(x)$ representa a equação de variedade de centro em $(0, 0)$ [59]. Se $h(x)$ é representada por uma série de potência, a variedade de centro deve ser representada como:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + f(x, h(x)) \quad (3.2)$$

Aplicando a equação (3.1) para diferentes classes de sistemas, identifica-se uma variedade de bifurcações. Entretanto, apenas uma delas permite o estudo de pontos críticos, quando o parâmetro do sistema alcança certos valores. A idéia na identificação do ponto de bifurcação consiste na determinação de $h(x)$. A expressão obtida mostra como o sistema se comporta dinamicamente na

vizinhança de $(0,0)$. Nas análises de colapso de tensão, somente a bifurcação Sela-nó é encontrada, se o modelo de fluxo de potência for usado [42].

A bifurcação Sela-nó é localmente identificada como:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -x^2 + \lambda \\ \frac{dy}{dt} &= -y\end{aligned}\tag{3.3}$$

onde x, y são as variáveis de estado e λ é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro.

As derivadas parciais da equação (3.3) pelas respectivas variáveis de estado são:

$$\begin{bmatrix} -2x & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}\tag{3.4}$$

A matriz acima tem dois autovalores: $-2x$ e -1 . Quando se varia de forma crescente o parâmetro λ , o sistema aproxima-se da bifurcação e o autovalor $2x$ tende a zero. Calculando o autovetor associado com o autovalor que se anula, tem-se:

$$Z = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}\tag{3.5}$$

A característica importante do autovetor Z é que o mesmo não é dependente das variáveis de estado.

No ponto de bifurcação, este autovetor associado ao autovalor nulo, define a direção no espaço estado das dinâmicas iniciais do colapso de tensão. A referência [36] mostra que monitorando o menor autovalor leva a conclusões imprecisas, uma vez que uma súbita variação é observada no ponto de bifurcação. Portanto, o autovalor de interesse no ponto de colapso não é o menor, em pontos de equilíbrio antes da bifurcação. Visto que o autovetor associado ao autovalor nulo na bifurcação, não sofre variação durante o processo de carregamento do sistema, ele deve ser usado para identificar o autovalor de interesse, para pontos de operação diferentes daquele da bifurcação. Aplicando decomposição de matrizes em autovalores para matriz Jacobiana J , tem-se:

Onde:

$$J = \sum_{i=1}^n x_i \lambda_i y_i^T \quad (3.6)$$

x_i é o autovetor à direita associado ao autovalor λ_i da matriz Jacobiana reduzida J .

y_i é o autovetor à esquerda associado ao autovalor λ_i da matriz Jacobiana reduzida J .

Utilizando-se a matriz Jacobiana reduzida J_{QV} , pode-se escrever a expressão acima como:

$$J_{QV} = \sum_{i=1}^n x_i \lambda_i x_i^T \quad (3.7)$$

Então:

$$\lambda_i = x_i^T J_{QV} x_i \quad (3.8)$$

ou

$$\lambda_{int} = Z^T J_{QV} Z \quad (3.9)$$

Onde λ_i é o autovalor de interesse, ou seja, que se anula na bifurcação. J_{QV} é a matriz Jacobiana reduzida do fluxo de carga mostrado em capítulo anterior e Z é o autovetor à direita identificado no ponto de bifurcação. Note que a decomposição apresentada acima, também é válida para a matriz Jacobiana do fluxo de carga J . A matriz J_{QV} foi sugerida por questão de simplicidade, haja vista que a mesma é quase simétrica [36]. Portanto os autovalores e valores singulares são basicamente os mesmos.

Como consequência, ao se recorrer aos mínimos autovalor e valor singular, é possível dizer que somente um autovalor/ valor singular é significativo, ou seja, o autovalor/ valor singular de interesse [57]. A referência [57] usa Z como o autovetor à direita associado ao autovalor nulo e a decomposição da matriz reduzida J_{QV} é aplicada para outros pontos de operação, determinando, portanto o autovalor de interesse sem limites de geração de potência reativa.

Testes são realizados utilizando o sistema IEEE-300 barras. Uma direção de crescimento de carga é escolhida de acordo com o carregamento inicial de cada barra. O sistema é então levado à bifurcação através da mudança no carregamento (variação do parâmetro λ). O ponto de bifurcação foi obtido com a ajuda do fluxo de carga continuado [49]:

$$\Delta\lambda = 0,3687$$

Com o propósito de constatar o comportamento do autovalor de interesse, quando não se consideram os limites de potência reativa, fizeram-se testes com o sistema citado acima. Inicialmente levou-se o sistema à bifurcação, onde se determinou o autovetor à direita \mathbf{Z} , associado ao autovalor nulo. O passo seguinte foi empregar a expressão (3.9), quando foi identificado o autovalor de interesse para cada ponto de operação. Dessa forma, os resultados encontrados estão mostrados no gráfico abaixo:

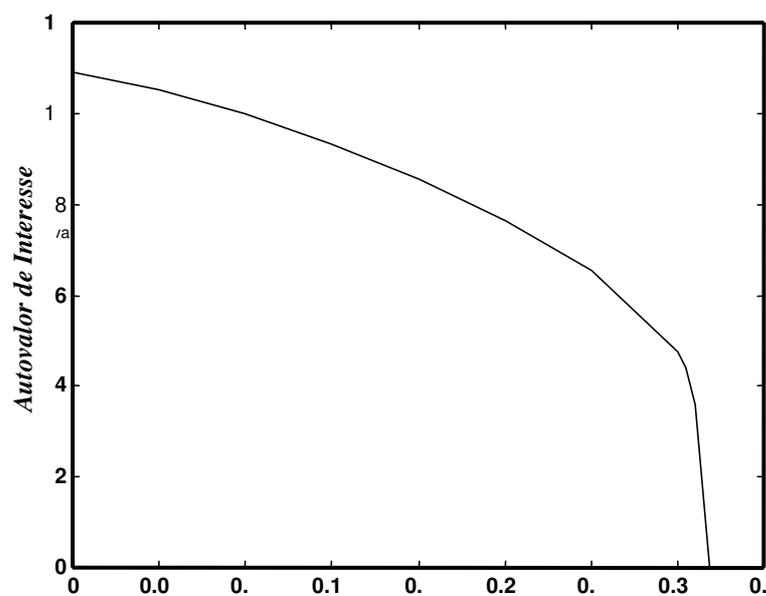


Figura 3.1 Autovalor de Interesse sem Considerações do Limite de Potência Reativa

A referência [57] mostra que o comportamento do autovalor de interesse em função do parâmetro de incremento de carga do sistema tem um comportamento muito similar ao comportamento do determinante reduzido, quando também não se consideram limites de potência reativa. Portanto, devido ao comportamento semelhante, esses índices reúnem as mesmas propriedades, baseando-se no mesmo conjunto de equações.

3.2.2 Autovalor de Interesse quando se consideram os Limites de Potência Reativa

A decomposição utilizada na equação (3.9) pode ser facilmente aplicada, se os limites de geração de potência reativa pelos geradores são desconsiderados e o autovetor à direita associado ao autovalor nulo no ponto de bifurcação não é conhecido. Nessa situação, os autovalores de interesse em função do parâmetro de incremento de carga apresentam comportamento quadrático, conforme relatado na referência [59]. Porém, isto não é tão simples, quando se consideram limites de potência reativa dos geradores. A matriz Jacobiana e a matriz correspondente de autovetores mudam de dimensão, quando barras PV tornam-se barras PQ. Portanto, a descoberta do autovalor de interesse quando se consideram os limites de potência reativa é um fato novo, ainda não relatado na literatura, que até então não se tinha alcançado, devido à forma como a matriz Jacobiana e a matriz correspondente de autovetores mudam de dimensão.

Com o propósito de superar esses problemas, propõem-se [60]:

Identificar a barra crítica do sistema. Para isso, deve-se usar a técnica do vetor tangente. De acordo com a referência [39] o vetor tangente permite uma identificação prévia da barra crítica, para pontos de operação distantes da bifurcação;

O passo seguinte é a identificação dos autovetores, cujas maiores entradas estão associadas com esta barra crítica, para outros pontos de operação:

Identificar o autovalor de interesse, através da decomposição de matrizes, conforme a expressão (3.9), usando todos os autovetores determinados, conforme item anterior.

Uma análise desse conjunto de autovalores associados aos autovetores determina o comportamento de um autovalor para cada ponto de operação em função do parâmetro de incremento de carga, até o ponto de bifurcação, como poderá ser observado em testes na seção seguinte.

3.2.3 Testes considerando Limites de Potência Reativa

Para testar a metodologia proposta na seção 3, será usado o mesmo sistema IEEE de 300 barras, onde o ponto de bifurcação é identificado para acréscimos de carga da ordem de 4.50% [36,39]. A barra crítica identificada no ponto de bifurcação para esse sistema é a 526. A etapa seguinte é determinar os autovetores cujas maiores entradas estão relacionadas com essa barra crítica e através deles (dos autovetores), determinar todos os autovalores associados. Observa-se que somente dois autovalores são identificados para cada ponto de operação. Entretanto, quando se faz incremento de carga no sistema, um dos autovalores é claramente invariante. Portanto o outro autovalor identificado para cada ponto de operação é o autovalor de interesse.

O gráfico 3 mostra o autovalor de interesse, quando se considera limites de potência reativa dos geradores, em função do parâmetro de acréscimo de carga do sistema.

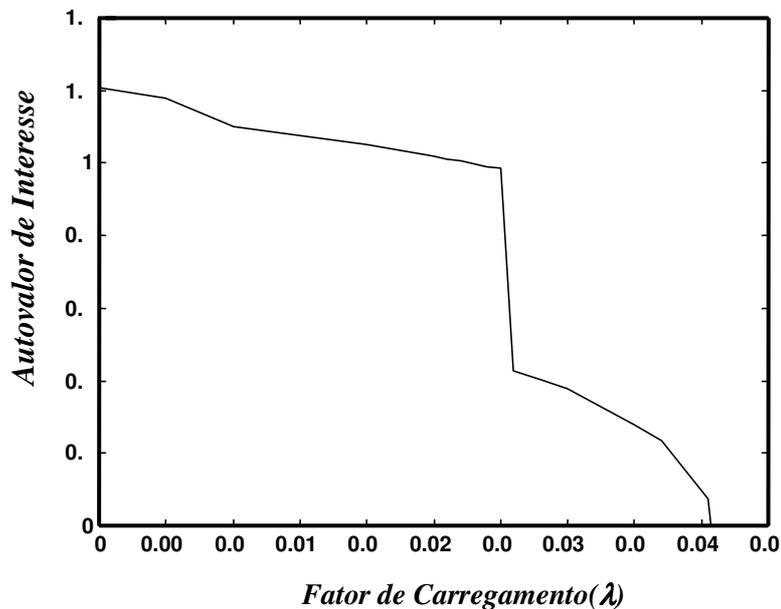


Figura 3.2 Autovalor de Interesse com Considerações de Limites de Potência Reativa

3.2.4 Conclusão

O comportamento do autovalor/valor singular de interesse quando se consideram limites de potência reativa dos geradores é o mesmo daquele obtido para o determinante reduzido e para o inverso do vetor tangente em função do parâmetro de carga do sistema, expostos na figuras 2.6 e 2.8 do capítulo 2, respectivamente. A conclusão mais importante é que existe um autovalor/ valor singular de interesse com as mesmas propriedades de outros índices propostos na literatura. Portanto, esses índices baseiam-se no mesmo conjunto de equações do autovalor/valor singular de interesse.

3.3 AÇÕES DE CONTROLE: CORTE DE CARGA NA ÁREA SÃO PAULO

3.3.1 Descrição da Área São Paulo

A Área São Paulo era formada pelas empresas CESP, Eletropaulo e CPFL (antes do processo de separação, privatização e criação de novas empresas de distribuição e geração), no qual apresenta uma rede de transmissão malhada em 440 kV, que interliga as usinas do rio Paraná aos centros consumidores. A rede em 440 kV se interliga com diversos outros Sistemas de Transmissão em todas as direções. Ao norte, a Área São Paulo se interliga com a rede em 500 kV (Furnas e CEMIG) do rio Paranaíba; a leste, com a rede em 500 kV (Furnas) da Área Rio de Janeiro /Espírito Santo; a oeste, com o Sistema em 230 kV (Enersul) de Mato Grosso do Sul; e, ao Sul, com dois Sistemas: (a) Sistema em 230 kV (COPEL e Eletrosul) do norte do Paraná; (b) com dois troncos de interligação (Furnas) da usina de Itaipu com o Sistema Interligado Sul /Sudeste brasileiro: (I) em Tijuco Preto 345 kV, proveniente do tronco em 765 kV, que integra Itaipu 60 Hz (6300 Mw) à rede, e interliga os Sistemas Sul e Sudeste brasileiros; (II) em Ibiúna 345 kV, subestação inversora do Elo em CCAT formado por dois bipólos de ± 600 kV cada, com potência nominal de 6300 Mw, que integra Itaipu 50Hz ao Sistema Sudeste brasileiro (ANEXO II).

O mercado da Área São Paulo é da ordem de 15000 Mw, cerca de 50% do mercado Sul /Sudeste brasileiro, com uma capacidade de geração instalada de 11100 Mw e compradora de 40% da energia de Itaipu (dados de 1998).

A Área São Paulo, historicamente, vinha trabalhando com folgas operativas na transmissão e na distribuição.

Com o aumento da carga da Área São Paulo e ausência de reforços na transmissão ao longo dos anos, desde a entrada dos troncos associados à usina de Itaipu, a folga operativa então existente, acabou.

A entrada em operação, mais recentemente, dos troncos de transmissão responsáveis pela integração da usina de Itaipu (12600 Mw de capacidade instalada) ao sistema mudou de forma acentuada os pontos mais sensíveis do Sistema da Área São Paulo, aliviando parte do tronco de 440 kV e em contrapartida, sobrecarregando parte dos troncos de 345 kV e 230 kV.

No entanto, a possibilidade de se explorar a rede malhada e todos os pontos de interligação da Área São Paulo com o restante do Sistema Interligado Sul/ Sudeste proporcionou a falsa idéia de que era possível trabalhar indefinidamente com este Sistema de Transmissão.

Nos últimos três anos (1995, 1996 e 1997) tornou-se patente a necessidade de se alterar de alguma maneira o modo de operação da Área São Paulo. A importação de potência reativa alcançava patamares de 1000 a 1500 Mvar nos períodos de carga pesada e parte da carga média, ultrapassando os valores médios necessários para a importação dos valores contratados de potência ativa provenientes de Itaipu através dos Sistemas de Transmissão de Furnas.

Foi criado em 1995 um subgrupo de trabalho do GCOI [58], com o objetivo de se equacionar os problemas de controle de tensão das Áreas São Paulo e Rio de Janeiro/ Espírito Santo e apontar soluções. A partir de 1997, a CESP decidiu retirar alguns reatores do tronco de 440 kV ou torná-los manobráveis, cerca de 1000 Mvar,

processo que se estende até os dias atuais, dentre outras medidas, no sentido de se permitir a operação da Área São Paulo de forma mais segura.

Os dois colapsos de tensão da Área São Paulo em abril de 1997 em dois dias seguidos (dias 24 e 25, quinta e sexta-feira, respectivamente) à mesma hora (em torno de 18h30min), hora de tomada de carga atingindo patamares de carga pesada (em torno de 1100 Mw em 15 minutos), precipitaram os acontecimentos.

O fenômeno da instabilidade de tensão seguido de um colapso parcial de tensão, até então um acontecimento típico de sistemas radiais, aconteceu em um sistema malhado, com mais de 50% de geração própria, com múltiplos pontos de interligação, enfim, em um sistema aparentemente robusto. À época, já havia alguns meses em que a importação de potência reativa pela Área São Paulo alcançava patamares de até 2000 Mvar em períodos de cargas média e pesada.

3.3.2 Política de Corte de Carga para a Área São Paulo

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 que aponta o vetor tangente.

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.

Inicialmente, considera-se a adoção de corte de carga na área de interesse, partindo-se de montantes de carga indicados pelas empresas, através do GCOI - Grupo Coordenador para Operação Interligada [62].

Numa segunda etapa é alocada compensação shunt adicional naquelas barras indicadas pelas Empresas para corte de carga e no conjunto de barras críticas indicadas pelo Vetor tangente. São analisados seus efeitos na margem de carga do sistema, norma do Vetor Tangente e nas perdas elétricas.

A referência [61] estabelece uma política de corte de carga por subtensão na Área São Paulo, classificada por Empresa e estágios:

Tabela 3.1 Estágios de corte de carga por Empresa

<i>Corte de Carga (MW)</i>	<i>Eletropaulo</i>	<i>CESP</i>	<i>CPFL</i>
1 ^o Estágio	200	50	50
2 ^o Estágio	195	50	50
3 ^o Estágio	223	50	50
4 ^o Estágio	210	54	50

A conclusão do relatório [61] é que os montantes de corte de carga, assim como as barras previamente determinadas mostraram-se como medidas adequadas.

Quanto à rampa de carga da Área São Paulo, existe uma relação entre a taxa de elevação da rampa de carga e a elevação da potência fornecida pelo síncrono de Ibiúna (capacidade 1200 Mvar). Para cada elevação de 1 Mw de carga na Área Paulo, o síncrono de Ibiúna contribui com 1,4 Mvar. [62].

Conhecendo o comportamento da rampa de carga da Área São Paulo foi possível estabelecer o momento de corte de carga, através do monitoramento do síncrono de Ibiúna.

Caso o síncrono de Ibiúna alcance o valor de fornecimento de potência reativa da ordem de 700 Mvar, é dado o alerta, e o corte de carga ocorre de forma manual e efetivamente para valores igual ou superior a 1000 MVAR [61,62].

Foi adotada apenas a prática de corte de carga para o primeiro estágio, fazendo um total de 300 MW na Área São Paulo, conforme estabelecido na Tabela 1.

3.3.3 Resultados dos Testes

A metodologia proposta é aplicada em um caso histórico do planejamento da operação do sistema sudeste brasileiro para o mês de novembro de 1997. Foi escolhido um caso de carga média em razão de ser este o mais crítico período de carga para o controle de tensão, nesta época do ano, devido a grande demanda de potência reativa.

Desta forma, serão detalhados inicialmente os resultados do corte de carga, tanto para aquelas barras determinadas pelas Empresas da Área São Paulo, quanto para aquelas barras críticas apontadas pela técnica do Vetor Tangente. Numa segunda parte, os

resultados da compensação shunt adicional nos grupos de barras críticas, analisando-se seus efeitos nas perdas elétricas e margem de carga do sistema.

3.3.3.1 *Caso Base*

A Tabela 3.2 apresenta um sumário do caso base escolhido para a elaboração dos testes de corte de carga e ações de controle. A tabela compara a participação da geração e carga da área de interesse (Sudeste) na geração e carga totais do sistema. Esse caso se apresenta bem estressado, visto que a margem de carga apresentada foi da ordem de 3,7 %, não considerando os limites de potência reativa dos geradores.

Tabela 3.2 Caso Base

<i>Novembro 1997 Carga Média</i>		<i>Sumário</i>
Geração Total (S/SE/CO)		30504,5 + j 3126,5
Carga Total (S/SE/CO)		28728,8 + j 14736,0
Geração Sudeste		15681,5 + j 1432,1
Carga Sudeste		21057,7 + j 7769,9
Compensadores Síncronos	Grajaú (-300 a 400)	35
	Vitória (-30 a 60)	25
	Ibiúna (-800 a 1200)	199
	T.Preto (-200 a 300)	237
	S.Ângelo (-170 a 250)	165
	Embuguaçú (-170 a 250)	202
Shunt (MVar)		4857,1
Perdas Totais		1775,6 – j 6752,3

3.3.3.2 Fazendo Corte de Carga

Com a intenção de facilitar a referência às ações de controle praticadas, ficam estabelecidas as seguintes abreviações:

Ecarga: Corte de carga praticado de acordo com a política estabelecida pelas Empresas da Área São Paulo [61];

VTcarga: Corte de carga nas barras críticas da Área São Paulo, indicadas pela técnica do Vetor Tangente, no mesmo montante proposto pela Empresas.

A Tabela 3.3 mostra um sumário das ações de corte de carga estudadas.

Tabela 3.3 Sumário das Ações de Corte de Carga

		Caso Base	Ecarga	VTcarga
Geração Potência Reativa Global (Mvar)		3126,50	849,0	311,4
Geração Potência Reativa da Área de Interesse (Mvar)		335,2	-553,4	-732,7
Compensores Síncronos (Mvar)	Santo Ângelo	165	93	76
	Embu Guaçu	202	121	108
	Ibiúna	199	-72	76
	Tijuco Preto	237	133	-135
Shunt (Mvar)		4857,1	4897,3	4912,4
Perdas Ativas (Mw)		1775,6	1701,3	1685,5
Perdas Reativas (Mvar)		-6752,3	-8665,9	-9108,4

A tabela 3.3 mostra que qualquer das medidas propostas para corte de carga apresentou desempenho satisfatório. Porém, quando se faz o corte de carga somente naquelas barras

indicadas pelo Vetor Tangente, na análise comparativa das duas técnicas obtém-se: maior redução das perdas totais, maior disponibilidade de potência reativa nos geradores e maior folga de potência reativa nos principais compensadores síncronos do sistema.

3.3.3.3 *Margem de Carga*

Para cada caso estudado, é calculada a margem de carga pelo método da continuação, através de um fluxo de potência continuado, com direção única de crescimento de carga na área de interesse, mantendo-se o fator de potência das cargas e redistribuindo-se as perdas e geração adicional pelos geradores da área. Pelo método do vetor tangente, obtém-se os grupos de barras críticas nos pontos de máximo carregamento de cada caso.

A Tabela 3.3 mostra os resultados dos cálculos das margens de crescimento de carga dos casos: base, com corte de carga nas barras indicadas pelas Empresas e determinadas pela técnica do Vetor Tangente. Para cada caso, estão listadas as margens de crescimento de carga em relação ao caso base.

Tabela 3.4 Margens de Crescimento de Carga

<i>Margens de Carga</i>	<i>Caso Base</i>	<i>Ecarga</i>	<i>VTcarga</i>
Geração Global Potência Reativa (Mvar)	3126,50	849,0	311,4
Geração Potência Reativa da Área de Interesse (Mvar)	335,2	-553,4	-732,7
Perdas Potência Reativa (Mvar)	-6752,3	-8665,9	-9108,4
Shunt (Mvar)	4857,1	4897,3	4912,4
λ (%)	3,7	8,4	11,2
Norma do Vetor tangente	277,95	129,63	72,92

Adotando-se a política de corte de carga das Empresas para a Área São Paulo, obteve-se uma margem de carga da ordem de 8,4 %. Quando se estabelece corte de carga pelo vetor tangente, a margem sobe para cerca de 10%. Com um maior ganho na margem de carga, o sistema apresenta, portanto uma maior folga, distanciando-se do ponto de bifurcação.

É importante analisar o comportamento da norma do vetor tangente para as situações estudadas. Quanto maior a margem de carga apresentada tem-se um menor tamanho da norma do vetor tangente, conforme relatado em capítulo anterior. Na tabela 3.4 pode-se observar que é possível monitorar também o sistema, pelo tamanho da norma do vetor tangente.

3.3.3.4 Grupos de Barras Críticas por Área

Tabela 3.5 Grupos de Barras Críticas por Área

<i>Área</i>	<i>Empresas</i>	<i>Carga Total por Área</i>	<i>Barras Críticas Indicadas para Corte de carga</i>	<i>Montante de Corte de Carga (Mva)</i>
ÁREA 04	ELETROPAULO	9536 + j 2891	422 - 429 - 459 - 462 475 - 476 - 481 - 493 713 - 717 - 729 - 731 733	205
ÁREA 05	CESP	723 + j 241	591 - 601 - 624 - 694 - 681 - 683 - 687 - 692 - 695 - 696 - 699	30
ÁREA 06	CESP (secundária)	1585 + j 720	2029 - 1950 - 1936 1960 - 1961 - 1966 747 - 725 - 2018 2019 - 2022 - 2017	27
ÁREA 08	CPFL	1141 + j 403	2211 - 2182 - 2204 2195 - 2253 - 2186 2198 - 2235 - 2189	60

As barras críticas foram identificadas pelo maior componente do Vetor Tangente, apontando as barras da Área 4 como aquelas que mais fortemente se modificam para uma variação de carga, devido à maior entrada no Vetor Tangente, ou seja o seu tamanho determinou aquelas barras críticas que teriam maior participação.

A Área 4 (Eletropaulo) caracteriza-se por uma região de alta concentração de carga, com grande peso industrial e comercial e pequeno parque gerador.

O parque gerador desta área apresenta restrições de geração: questões hidrológicas, como volume escasso de água, aspectos constitucionais que determinam manutenção de armazenamento volumétrico na Represa Billings e as instalações térmicas; antigas, de baixa confiabilidade e alto custo de geração.

Como o fenômeno de estabilidade está associado ao esgotamento dos recursos de potência reativa, já era esperado que a técnica do Vetor Tangente identificasse barras críticas desta área, onde efetivamente na situação de sinalização deveria haver maior atuação de corte de carga.

A tabela 3.5 mostra as áreas envolvidas no corte de carga e as barras onde efetivamente houve a atuação de corte de carga.

3.3.3.5 Fazendo Compensação de Potência Reativa

Os testes seguintes simularam a instalação de bancos de capacitores nas barras indicadas pelas Empresas para corte de carga e nas barras críticas indicadas pelo Vetor Tangente na Área São Paulo. Foi simulada a inserção de um total de 100 MVAR inicialmente e em seguida um total de 150MVAR, nas duas situações.

Não foram efetuadas cortes de carga, cuja meta é verificar como se comporta a margem de carga tomando-se apenas, medidas prévias de compensação shunt.

A tabela 3.6 mostra os resultados da compensação reativa, tanto nas barras indicadas para corte de carga pelas Empresas, quanto pelas barras indicadas como críticas pelo vetor tangente.

Tabela 3.6 - Compensação Shunt

<i>Compensação Shunt</i>	<i>Caso Base</i>	<i>Compensação de Barras Empresas</i>		<i>Compensação de Barras V.Tangente</i>	
		<i>100MVar</i>	<i>150MVar</i>	<i>100MVar</i>	<i>150MVar</i>
Geração Global Potência Reativa (MVar)	3126,50	2971,4	2971,4	2291,2	1932,7
Geração Potência Reativa da Área de Interesse (MVar)	335,2	300,4	144,4	58,6	-73,9
Perdas Potência Reativa (MVar)	-6752,3	-6865,2	-7192,7	-7379,4	-7638,0
Shunt (MVar)	4857,1	4895,5	5005,5	5065,8	5165,7
λ (%)	3,7	8,0	8,5	11,50	12,50
Norma do Vetor tangente	277,95	126,46	123,82	81,51	79,10

Pode-se observar pela tabela 3.6 a maior eficiência no ganho da margem de carga, quando a localização da compensação shunt adicional situa-se nas barras críticas indicadas pelo Vetor Tangente. Conhecendo-se, portanto as barras críticas e fazendo-se compensação shunt nas mesmas, tem-se um maior ganho da margem de carga, distanciando o sistema, da bifurcação.

3.4 CONCLUSÕES

Com relação ao autovalor de interesse pode-se observar que o comportamento do autovalor/ valor singular de interesse quando se consideram limites de potência reativa dos geradores é o mesmo daquele obtido para o determinante reduzido e para o inverso do vetor tangente em função do parâmetro de carga do sistema. A conclusão mais importante é que existe um autovalor/ valor singular de interesse com as mesmas propriedades de outros índices propostos na literatura. Portanto, esses índices baseiam-se no mesmo conjunto de equações do autovalor/ valor singular de interesse.

A proposta de se fazer corte de carga para se evitar o colapso de tensão naquelas barras indicadas pelo Vetor Tangente, barras críticas, e em seguida fazer uma análise comparativa com aquelas barras propostas pela Empresas da Área São Paulo mostrou resultados de interesse, uma vez que se obtiveram ganhos na margem de crescimento de carga do sistema.

Conhecendo o comportamento da rampa de carga da Área São Paulo foi possível estabelecer o momento de corte de carga, através do monitoramento do síncrono de Ibiúna.

Portanto, a técnica do Vetor Tangente também mostrou eficiência na análise do sistema para adição de compensação shunt, quando mais uma vez obtiveram-se resultados satisfatórios, no qual habilita o método proposto para a tomada de decisões.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

4.1 PROBLEMA EXAMINADO

A operação dos grandes troncos de transmissão com carregamentos próximos dos limites contribuíram para o aumento das perdas de potência reativa, para o esgotamento dos recursos deste tipo de potência e para os problemas de estabilidade de tensão.

Uma política de corte de carga vem como último recurso para recuperação da margem operativa do sistema a curto-prazo, restando também às equipes de planejamento estudos de utilização dos recursos de potência reativa e compensação reativa shunt adicional.

No cenário atual, onde os índices de atendimento têm sempre prezado a continuidade do fornecimento de energia, é imperativo adotar políticas otimizadas no sentido de se evitar corte de carga ou numa situação de extrema necessidade, minimizar o montante da carga a ser cortada.

Este trabalho fez uma análise comparativa entre a política de corte de carga ora adotada pelas empresas da Área São Paulo em relação a outra metodologia, utilizando-se ferramentas que pudessem propor maior ganho de margem de carga, permitindo maior folga operativa ao sistema interligado nacional.

Outro aspecto importante foi a análise do comportamento do autovalor/ valor singular de interesse quando se consideram limites de potência reativa dos geradores. A conclusão mais importante é que existe um autovalor/ valor singular de interesse com as

mesmas propriedades de outros índices propostos na literatura. Portanto, esses índices baseiam-se no mesmo conjunto de equações do autovalor/ valor singular de interesse.

4.2 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho mostrou que a prática de corte de carga em sistema estressado, considerado como recurso final. Essa ação deve ser efetuada usando ferramentas que possam trazer maior ganho no que diz respeito à margem de crescimento de carga, na redução das perdas elétricas, na disponibilidade de potência reativa nos geradores, etc.

A identificação das barras críticas e locação de compensação shunt também mostraram eficazes, uma vez que se obtiveram ganhos consideráveis na margem de carga do sistema.

Na análise comparativa das duas metodologias propostas de corte de carga nesse trabalho, o Vetor Tangente sempre mostrou mais eficaz: elevando a margem de carga do sistema, reduzindo as perdas elétricas e elevando a reserva de potência reativa dos geradores.

Outro aspecto importante foi apontar um autovalor/ valor singular de interesse, quando se consideram os limites de potência reativa dos geradores. Analisando o comportamento do mesmo pôde observar os resultados, concluindo que possui as mesmas características obtidas para o determinante reduzido.

4.3 SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Alguns desenvolvimentos adicionais podem ser realizados em trabalhos futuros:

Analisar o comportamento do autovalor/ valor singular de interesse para sistemas de grande porte equipados com: troncos carregados, elos de corrente contínua, capacitores série controlados, compensadores estáticos, etc.

Avaliar a ação de corte de carga, instalação de compensação série em circuitos críticos, utilizando técnicas de otimização e fazer comparações com aquelas utilizadas neste trabalho.

Estudar outras ações de controle como corte de carga, inibição de crescimento de carga, congelamento de tapes, instalação de compensação série em circuitos críticos.

Estudar a influência de diferentes direções de crescimento de carga, crescimentos com alteração do fator de potência e influência da redistribuição de perdas em geradores do sistema durante estas simulações.

Referências Bibliográficas

- [1] KUNDUR, P., MORISON, G. K., “*A Review of definition and Classification of Stability Problems in today’s Power Systems*”. *IEEE PES Meeting*, Nova York, Fevereiro 1997.
- [2] A. C. ZAMBRONI, DE SOUZA, “*Estabilidade de Tensão-Novas Ferramentas de Análise*”, Departamento de Eletrotécnica,EFEI-Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá-MG,1999.
- [3] KUNDUR, P., “*General Introduction and Basic Concepts of Voltage Stability Analysis*,”In: *IEEE PES Summer Meeting, IEEE Special Tutorial Course:Voltage Stability*, San Diego,1998.
- [4] TAYLOR, C. W.,“*Maybe I Can’t Define Stability, but I Know It When I See It*” *IEEE/PES-Panel on Stability Terms and Definitions*, Nova York, 1997.
- [5] KUNDUR, P., “*Power System Stability and Control*” Palo Alto: Mc Graw Hill, 1994.
- [6] STRUBBE, M., BIHAIN,A., DEUSE, J., BAADER,J.C., “*Stag –A New Unified Software Program for the Study of Dynamic Behavior of Electrical Power Systems*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, No.1, 1989.
- [7] EPRI Report EL-6627, “*Long Term Dynamics Simulation: Modeling Requeriments*”, preparado pela Ontário Hydro, 1989.
- [8] TAYLOR, C. W. “*Power System Voltage Stability.*” McGraw-Hill, 1994.
- [9] SAUER, P. W., PAI, M. A. “*Power System Steady-State Stability and the Load-Flow Jacobian*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.5, No.4, pp.1374-1383, Novembro, 1990.

- [10] PRICE, W. W. et al. "*Load Representation for Dynamic Performance Analysis*". IEEE Transactions on Power Systems, V.8, No.2, pp.472-482, Maio, 1993.
- [11] D' AJUZ, A. et al. *Equipamentos Elétricos – "Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão"*. Universidade Federal Fluminense/EDUFF, Rio de Janeiro: - Niterói,1987.
- [12] CAMPANHOLO F. B, ARAÚJO, J. M., GERALDES F, 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.
- [13] 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.
- [14] PAL, M. K. "*Voltage Instability Considering Load Characteristics*". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. PWRS 7, No.1, Fev. 1992, pp.243-249.
- [15] 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.
- [16] WEEDY.B.M "*Electric Power Systems*". John Wiley & sons, 1967
- [17] CUTSEM, T.V., JACQUEMART, Y., MARQUET, J., PRUVOT, P., "*A Comprehensive Analysis of Mid-term Voltage Stability*", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.10, No.3, pp.1173-1182, Agosto, 1995.
- [18] CUTSEM, T.V., MAILHOT, R., "*Validation of a fast Voltage Stability Analysis Method on the Hydro-Québec System*", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.12, No.1, pp.282-292, Fevereiro, 1997.

- [19] TARANTO, G.N, A. C. ZAMBRONI DE SOUZA, JARDIM, J. L. ,.SILVA NETO, C. A., ALVES DA SILVA, A. P. , FALCÃO, D.M. , .BORGES, C.L.T., “*A New On-Line Dynamic Assessment System,,* IV SEPOPE, Salvador,Brasil,Paper SP-104,Maio 1998.
- [20] A. C. ZAMBRONI DE SOUZA , JARDIM, J. L. A.,SILVA NETO,C. A., ALVES DA SILVA, A. P., TORRES, G. L., FERREIRA,C., FERREIRA, L. C. A, “*A New Contingency Analisis Approach for Voltage Collapse Assessment*”, submetido À Eletric Power Systems Research, 1998.
- [21] VERNIKOV,V.A.,“*Transient Processes in Electrical Power Systems*” Mir Publishers. . pp.497, Moscou, 1980.
- [22] VERNIKOV,V.A.,STROEV,V.A.,IDELCHICK,V.I.,TARASOV,V.I. “*Estimation of Electrical Power Systems Steady State Stability in Load Flow Calculations.*”- *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.Vol., PAS-94*, No. 3, pp.1034-1041, Maio/Junho 1975.
- [23] ABE,S.,FUKUNAGA,Y.,ISONO,A.,KONDO,B. “*Power Systems Voltage Stability.*” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.*_Vol. PAS-101, No. 10, pp.3831-3840, Outubro, 1982.
- [24] KWATNY,H.G.,PASRIJA. A. K.,BAHAR,L.Y. “*Static Bifurcations in Electric Power Networks : Loss of Steady-State Stability and Voltage Collapse*” *IEEE Transactions on Circuits and Systems.*_Vol. CAS-33. No.10, pp.981-991, Outubro 1986.
- [25] TIRANUCHIT, A. & THOMAS.R.J. “*A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems.*” *IEEE Transactions on Power Systems.*_Vol. 3 , No. 1, pp.87-93, Fevereiro 1988.
- [26] CEPEL Centro de Pesquisas de Energia Elétrica “*Programa de Análise de Redes*”. V08-jan2003.

- [27] SCHLUETER, R. A., HU, I., CHANG, M. W. et al. "**Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse.**" *IEEE PES Winter Meeting-Paper 90WM 096-8 PWRs*, 1990.
- [28] FLATABO,N.,OGNEDAL R., and CARLSEN,T., "**Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods**", *IEEE Transactions on Power Systems* ,Vol.5, pp.1286-1293, Novembro ,1990.
- [29] BELOVIC,M.,PHADKE,A ., "**Control of Voltage Stability using Sensitivity Analysis**". *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 9,pp.946-956, Maio 1994.
- [30] CUTSEM,T.V., "**A Method to Compute Reactive Power Margins with Respect to Voltage Collapse.**" *IEEE/PES 90 WM 097-6 PWRs*, Fevereiro, 1990
- [31] GRANVILLE,S.,MELLO,J.C.O, MELO,A .C.G., "**Application of Interior Point Method to Power Flow Unsolvability**," *IEEE/PES Summer Meeting*, paper no. 95 SM 599-1 PWRs, Portland , Junho 1995.
- [32] IRISARRI,G.D.,WANG,X., JONG,T., and MOKHTARI,S., "**Maximum Loadability of Power Systems using Interior Point Non-Linear Optimization Method**", *IEEE Transactions on Power Systems* ,Vol. 12, No.1, pp.162-172, Fevereiro, 1997.
- [33] CAÑIZARES, C. A. "**Voltage Collapse and Transient Energy Function Analyses of AC/DC Systems.**" University of Wisconsin-Madison, 1991. (tese PhD).
- [34] PRADA, R. B., A. C., ZAMBRONI DE SOUZA, VIEIRA FILHO, X. "**Voltage Stability : Phenomena Characterization Based on Reactive Control Effects and System Critical Areas Identification.**" Apresentado no 3^o Encontro SEPOPE, Belo Horizonte, 1991.

- [35] MANSOUR, Y., *“Industry Practice in Voltage Stability Analysis of Power Systems” Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III -Voltage Stability and Security*, ECC Inc., Suíça, Agosto, 1994.
- [36] CAÑIZARES, C. A ., A. C., ZAMBRONI DE SOUZA, QUINTANA, V. H., *“Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse”*. *IEEE Transactions on Power Systems* ,Vol. 11 , No.3, pp.1441-1450, Agosto 1996.
- [37] A. C., ZAMBRONI DE SOUZA, *“Determinação da Barra Crítica e do Ponto de Colapso pelo Vetor Tangente” XI Congresso Brasileiro de Automática.*, pp.1393-1998 Vol.3, São Paulo, 1996.
- [38] A. C., ZAMBRONI DE SOUZA, CAÑIZARES, C. A., QUINTANA, V. H. *“Critical Bus and Point of Collapse Determination Using Tangent Vectors” 28th North American Power Symposium*, USA, 10-12, pp.329-333. Cambridge, 1996.
- [39] A.C., ZAMBRONI DE SOUZA, CAÑIZARES, C. A , QUINTANA, V. H. *“New Techniques to Speed up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors,” IEEE/PES Summer Meeting – Paper PE-219- PWR-0-11-1996*, Berlim, Julho, 1997.
- [40] GCOI-Grupo Coordenador para Operação Interligada, *“Análise das Perturbações dos dias 24 e 25/04/97 no sistema Interligado S/SE/CO”*
- [41] SEYDEL, R., *From Equilibrium to Chaos – “Practical Bifurcation and Stability Analysis.”* Elsevier Science, Holanda, 1988.
- [42] CAÑIZARES, C. A ., *“Conditions for Saddle-node Bifurcations in AC/DC Power Systems with Losses” IEEE Transactions on Power Systems* ,Vol. 36 , No.11, pp.1423-1429, 1989.
- [43] THE MATH WORKS INC. **MATLAB user’s guide**. Massachusetts , 1993.

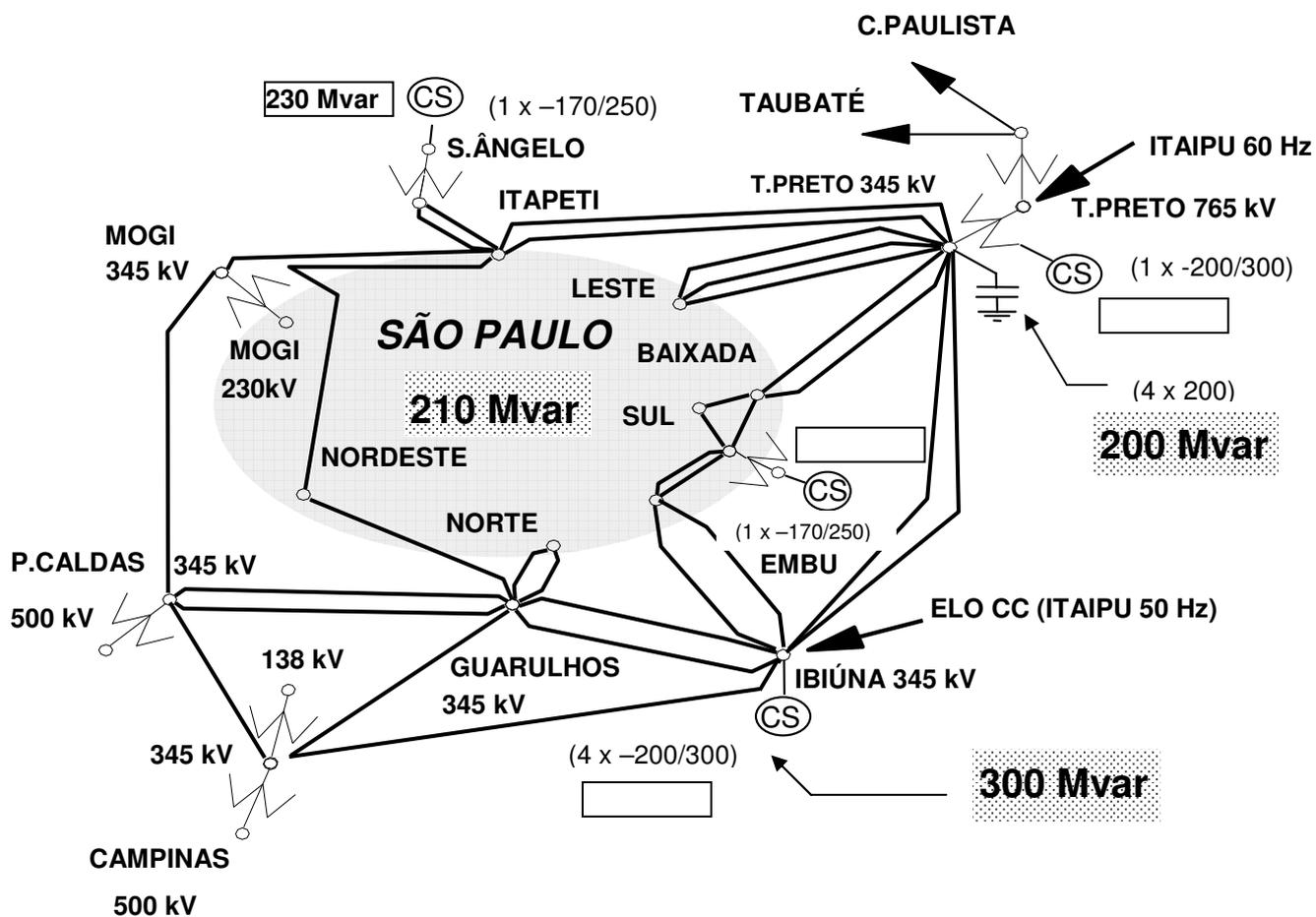
- [44] BARQUIN J., GÓMEZ T., PAGOLA, F., L., “*Estimating the Loading Limit Margin Taking into Account Voltage Collapse Areas*” *IEEE/PES_Winter Meeting –paper 95 WM 183-4 PWRs*, 1990, Janeiro-Fevereiro, 1995.]
- [45] LÖFF, P. A., SMED, T., ANDERSON, G., HILL, D. J., “*Fast Calculation of a Voltage Stability Index*”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.1, pp.54-64, Fevereiro, 1992.
- [46] MORISON, G. K., GAO, B., KUNDUR, P. “*Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis*”. *IEEE/PES Winter Meeting, paper 90 WM 096-8 PWRs*, 1990.
- [47] MARANNINO, P., BRESEST, P., DELFANTI, M., GRANELLI, G. P., MONTAGNA, M., “*Voltage Collapse Proximity Indicators for very Short Term Security Assessment*”. *Proc. Bulk System Voltage Phenomena III- Voltage Stability and Security*, ECC Inc., Suíça, Agosto, 1994.
- [48] HORN, R. A., JOHNSON, C. R. “*Matrix Analysis*.”: Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- [49] CAÑIZARES, C. A., ALVARADO, F. L. “*Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems*”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, No.1, pp.1-8, Fevereiro, 1993.
- [50] AJJARAPU, H. D. et al., “*Identification of Steady-State Voltage Stability in Power Systems*”. *Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry*, pp.244-247, Março, 1988.
- [51] ALVARADO, F. L., JUNG, T. H., “*Direct Detection of Voltage Collapse Conditions*” ”. *Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena- Voltage Stability and Security*, EL-6183, EPRI, pp.5.23-5.38, Janeiro, 1989.
- [52] SCOTT, W. H., MARK, B. L., VANELLI, A., “*An Efficient Eigenvector Approach for Finding Netlist Partition*” *IEEE Transaction on CAD/ICAS*, Vol.11, No. 7, pp.885-892, Julho, 1992.

- [53] JARDIM,J.L.A .,SILVA NETO.C.A.FERNANDES,M.A., “*Programa de Fluxo de Potência para Sistema de Avaliação Dinâmica-LFLOW*”.
- [54] MARTINS ,A.C.B., L.R.A. CORREIA, A. V.GOMES E H.J.C.P. PINTO, “*Estudos e Ferramentas de Estabilidade de Tensão Utilizados no Âmbito do Planejamento da Operação Elétrica do Sistema Interligado*”, XIII SNPTEE, Outubro 1995.
- [55] MARTINS,A.C.B, GOMES ,A.V., PINTO, H.J.C.P., PONTES C.E.V. E TAKAHATA, A.Y. “*Investigações e Propostas de Solução Para o Fenômeno do Colapso de Tensão na Área Rio de Janeiro/Espírito Santo*”, V SEPOPE, Maio 1996.
- [56] MARTINS,A.C.B, GOMES ,CARIJÓ,L.M.S.,PINTO, H.J.C.P. e Takahata, A.Y.“*Avaliação de soluções para o fenômeno da Instabilidade de Tensão no Sistema Interligado Sul/Sudeste Brasileiro*”.
- [57] A. C. ZAMBRONI DE SOUZA, “*Discussion on Some Voltage Collapse Indices*”,. Accepted for publication on Electric Power Systems Reesarch.
- [58] Relatório SCEL/GTPM-07/96 - “*Estudo de Controle de Tensão para as Áreas Rio de Janeiro/Espírito Santo e São Paulo (3ª Etapa)*”, outubro/1996.
- [59] A. C. ZAMBRONI DE SOUZA, J. MACIEL F.,“*Identifying a Vanishing Eigenvalue, with Limits Consideration*”,. Accepted for publication on Electric Power Systems Reesarch.
- [60] VERHULST,F., “*Nonlinear Differential Equations and Dinamical Systems*”,. Springer-Verlag,1985.
- [61] FERREIRA, L.C.A - “*Medidas Operativas para evitar Colapso de Tensão no Sistema Interligado Sul/Sudeste*”, outubro/1997.

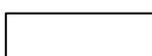
- [62] GCOI- Grupo Coordenador para Operação Interligada, Medida Operativa No. 132
- ELETROBRÁS - *“Medidas Preventivas para a ponta de Carga do Sistema em Dias Úteis e Sábados”*, setembro/1997.

ANEXO I

PERTURBAÇÃO 24 DE ABRIL DE 1997



Carga Interrompida(S/SE/CO): 7600 Mw

-  Recurso Total Impedido
-  Geração Pré-Distúrbio

ANEXO II

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.

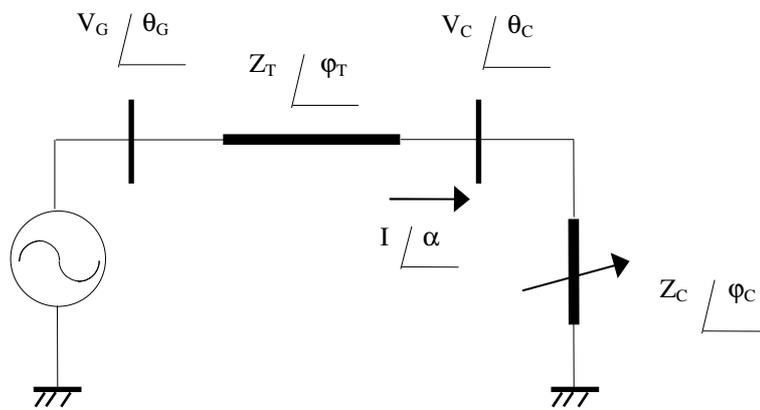


Figura I.1 Circuito equivalente para o sistema em análise

Onde:

$$Z_T \angle \varphi_T = Z_T \cos(\varphi_T) + j Z_T \sin(\varphi_T) \quad (\text{I.1})$$

$$Z_C \angle \varphi_C = Z_C \cos(\varphi_C) + j Z_C \sin(\varphi_C) \quad (\text{I.2})$$

Fazendo-se:

$$Z \angle \varphi = Z_T \angle \varphi_T + Z_C \angle \varphi_C \quad (\text{I.3})$$

$$Z \angle \varphi = [Z_T \cos(\varphi_T) + Z_C \cos(\varphi_C)] + j [Z_T \sin(\varphi_T) + Z_C \sin(\varphi_C)] \quad (\text{I.4})$$

Então:

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

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

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

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

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

E para a potência ativa da carga tem-se:

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

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.

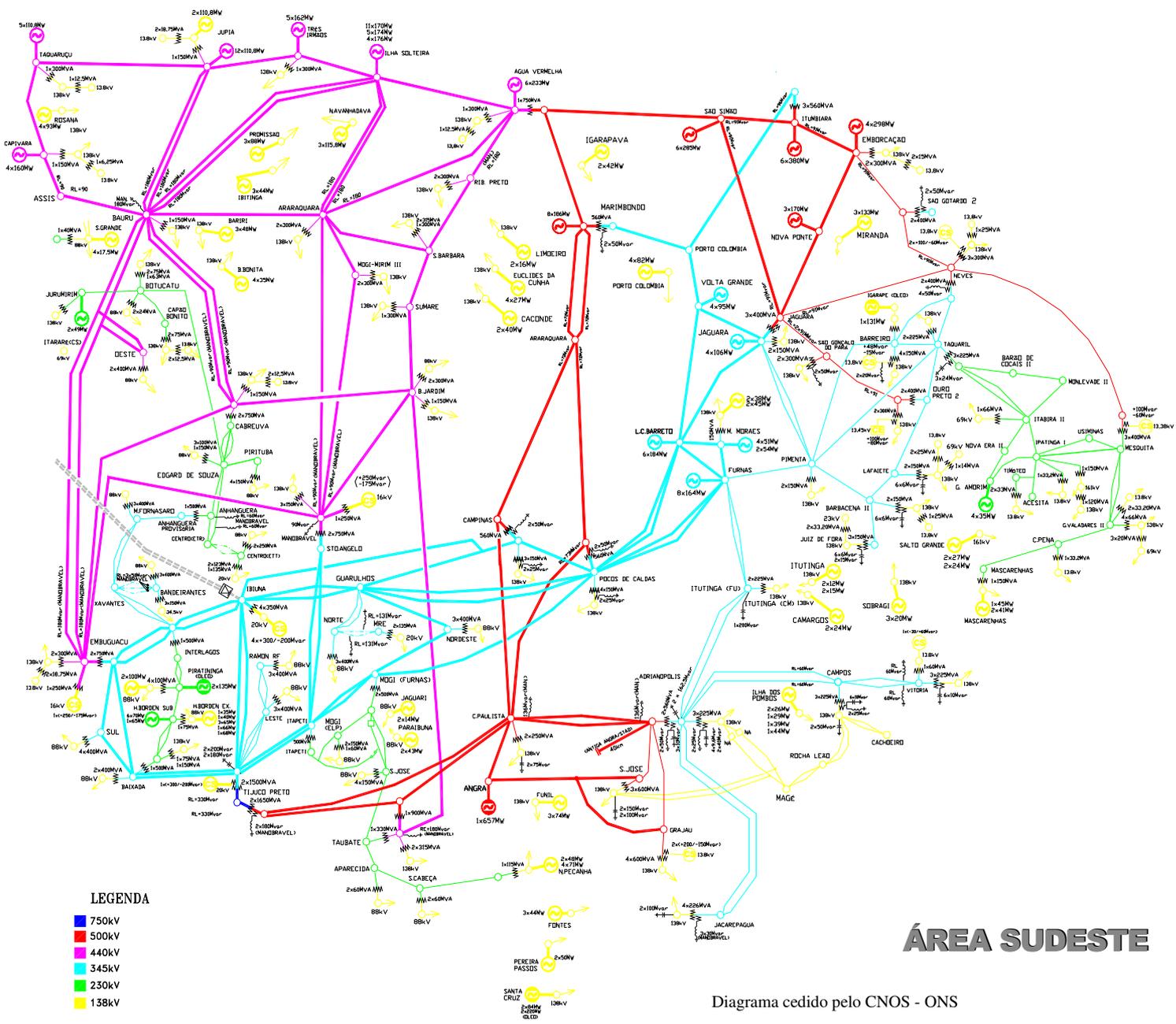
Como o carregamento máximo transmitido ocorre quando o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão, ao fazer-se $Z_C = Z_T$ nas Equações I.7 e I.8 obtêm-se as seguintes expressões para o módulo da tensão crítica na barra de carga e a correspondente carga ativa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

ANEXO III



ÁREA SUDESTE