

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Luiz Frederico Borges Vasconcelos

Utilização do Método de Função Energia em Estudos de Estabilidade de Tensão

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:

Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza

Dezembro de 2007

Itajubá – MG

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

V331u

Vasconcelos, Luiz Frederico Borges

Utilização do método de função energia em estudos de estabilidade de tensão / Luiz Frederico Borges Vasconcelos. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2007.

112 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Função energia. 2. Colapso de tensão. 3. Soluções instáveis do fluxo de carga. 4. Matriz Jacobiana. 5. Método da Continuação. I. Souza, Antonio Carlos Zambroni de, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

CDU 621.3.027(043)

À minha querida família, Denise, Pedro e Fernanda

“A mudança está em tuas mãos. Reprograma tua meta, busca o bem e viverás melhor. Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as oportunidades que Ele tem me proporcionado nesta minha existência, sem as quais nada teria conseguido.

À minha esposa Denise e aos meus filhos Pedro e Fernanda pelo amor, carinho e apoio.

Ao meu amigo e orientador Antônio Carlos Zambroni de Souza, sem dúvida um dos melhores seres humanos que já conheci na minha vida, pela orientação, amizade e constante incentivo ao longo de todo o doutorado.

Aos meus amigos de Itajubá, Rafael Leme e Isaías Lima, pelas valorosas contribuições para o sucesso deste trabalho.

Ao ONS, em particular à minha gerente Maria das Graças Vasconcelos Camelo, pelo apoio e suporte para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos do trabalho pelo constante estímulo durante esta jornada.

Aos funcionários da UNIFEI, em especial a Cristina Silva, sempre muito atenciosos comigo.

Sumário

Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	9
Lista de Abreviaturas e Siglas	10
Resumo.....	11
Abstract	13
Capítulo 1	15
1.1 Introdução.....	15
1.2 Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular.....	17
1.3 Análise Conceitual da Estabilidade de Tensão.....	18
1.4 Caracterização do Fenômeno.....	19
1.5 Classificação de Estabilidade de Tensão.....	20
1.6 Fatores de Influência na Estabilidade de Tensão	21
1.6.1 Geradores.....	21
1.6.2 Sistema de Transmissão	21
1.6.3 Cargas	22
1.6.4 Transformadores.....	24
1.6.5 Dispositivos de Compensação de Potência Reativa	24
1.7 Análise Estática	26
1.8 Organização do Trabalho.....	26
Capítulo 2	28
2.1 Introdução.....	28
2.2 Bifurcações em Sistemas Elétricos de Potência	29
2.3 Método da Decomposição da Matriz Jacobiana em Autovalores	32
2.4 Método do Vetor Tangente.....	35
2.5 Método da Continuação.....	38
2.6 Método Direto	39
2.7 Técnica da Função Energia.....	40
Capítulo 3	41
3.1 Introdução.....	41
3.2 Definições de Estabilidade	41
3.3 Método de Lyapunov.....	44
3.4 Função de Lyapunov para Sistemas Elétricos de Potência.....	47
3.5 Métodos de Função Energia em Estudos de Estabilidade Transitória.....	52
3.5.1 Closest UEP.....	52
3.5.2 O UEP de controle.....	53
3.5.3 O Método PEBS	53
3.5.4 O Método BCU.....	55
3.6 Função Energia Aplicada em Análises de Colapso de Tensão.....	56
3.7 Função Energia em Coordenadas Retangulares	60
Capítulo 4	63
4.1 Introdução.....	63
4.2 Múltiplas Soluções das Equações do Fluxo de Carga	64

4.3	Métodos para a Determinação das Soluções Instáveis das Equações do Fluxo de Carga.....	67
4.4	Método Proposto para a Identificação da Solução Instável Crítica.....	69
Capítulo 5	71
5.1	Introdução.....	71
5.2	Algumas Aplicações Utilizando a Matriz Jacobiana Estendida	71
5.3	Função Energia Incorporada à Matriz Jacobiana	80
Capítulo 6	84
6.1	Introdução.....	84
6.2	Resultados da Aplicação da Função Energia para o Cálculo da Margem de Carga.....	85
6.3	Resultados da Aplicação da Função Energia para o Cálculo da Margem de Carga em Coordenadas Retangulares	96
6.4	Aplicação do Método em Análise de Corte de Carga	100
Capítulo 7	102
Referências Bibliográficas.....		106

Lista de Figuras

1.1	Sistema de duas barras	15
1.2	Curva PV	16
2.1	Diagrama de bifurcação sela-nó	27
3.1	Ponto de equilíbrio estável	39
3.2	Ponto de equilíbrio assintoticamente estável	40
3.3	Ponto de equilíbrio assintoticamente estável ao extremo	40
3.4	Poço de energia	42
3.5	Função energia versus potência ativa da carga	54
4.1	Sistema de 3 barras	62
6.1	Sistema de 6 barras do IEEE	85
6.2	Curvas PV – 6 barras IEEE, com limites	88
6.3	Curvas PV – 6 barras IEEE, sem limites	88
6.4	Curvas PV – 14 barras IEEE, com limites	89
6.5	Função Energia – 6 barras IEEE, com limites	90
6.6	Função Energia – 6 barras IEEE, sem limites	90
6.7	Função Energia – 14 barras IEEE, com limites	91
6.8	Função Energia – 30 barras IEEE, com limites	91
6.9	Função Energia – 57 barras IEEE, com limites	92
6.10	Função Energia – 118 barras IEEE, com limites	92
6.11	Função Energia – 214 barras NE, com limites	93
6.12	Curvas PV – 6 barras IEEE, com limites	96
6.13	Função Energia – 6 barras IEEE, com limites	96
6.14	Curvas PV – 6 barras IEEE, com corte de carga	97
6.15	Função Energia – 6 barras IEEE, com corte de carga	98

Lista de Tabelas

4.1	Soluções do sistema de 2 barras	63
6.1	Valores de referência – Método da Continuação	82
6.2	Método da função energia	82
6.3	Soluções estáveis e instáveis iniciais, com limites	85
6.4	Soluções estáveis e instáveis iniciais, sem limites	86
6.5	Soluções estáveis e instáveis no ponto de colapso, com limites	86
6.6	Soluções estáveis e instáveis no ponto de colapso, sem limites	87
6.7	Método da função energia em coordenadas retangulares	94
6.8	Soluções estáveis e instáveis iniciais	94
6.9	Soluções estáveis e instáveis no ponto de colapso	95

Lista de Abreviaturas e Siglas

LTC	do inglês, Load Tap Change
CAG	Controle Automático de Geração
SVC	do inglês, Static Var Compensator
CS	Compensador Síncrono
UEP	do inglês, Unstable Equilibrium Point
SEP	do inglês, Stable Equilibrium Point
TEF	do inglês, Transient Energy Function
BCU	do inglês, <u>B</u> oundary of Stability Region <u>C</u> ontrolling <u>U</u> nstable Equilibrium Point
PEBS	do inglês, Potencial Energy Boundary Surface
PFM	do inglês, Path-Following Methods
SSSM	do inglês, State Space Search Methods

Resumo

Esta tese aborda a questão da estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência. Vários aspectos são discutidos, como por exemplo, a análise conceitual, fatores de influência e caracterização do fenômeno de colapso de tensão. Alguns métodos de análise estática são apresentados, ressaltando-se seus objetivos, que são: o diagnóstico do ponto de operação, a determinação da barra crítica do sistema de potência e da margem de carga até o ponto de colapso de tensão.

Métodos de função energia e suas aplicações em análises dinâmicas de sistemas de potência são abordados, bem como os aspectos teóricos de estabilidade de sistemas e a função de Lyapunov para sistemas de potência. Uma breve descrição de métodos de obtenção das soluções consideradas pontos de operação instáveis, a partir das equações do fluxo de carga, também é apresentada, tendo em vista sua importância na técnica de cálculo da função energia em análises estáticas.

Em seguida a metodologia proposta nesta tese é introduzida. Trata-se do método da função energia utilizado em análise estática de estabilidade de tensão. Neste caso apenas a energia potencial do sistema é considerada. Esta metodologia, que tem por objetivo a determinação da margem de carga de um sistema elétrico de potência até o ponto de colapso, pode também ser utilizada para a determinação de corte de carga. Com o auxílio de uma matriz Jacobiana estendida, incorporam-se nesta matriz as equações da função energia – obtendo-se, ao final do processo iterativo, um valor próximo de zero na energia do sistema – e as equações do fluxo de carga, para se obter as atualizações das soluções instáveis a cada iteração.

Neste trabalho também é proposto um método para a determinação das soluções instáveis de um sistema de potência. Tal método baseia-se em uma estimativa da tensão

na barra crítica com valor reduzido, uma vez que essas soluções são utilizadas nas equações da função energia.

Finalmente, o trabalho apresenta os resultados dos testes realizados em sistemas elétricos de potência com o programa computacional que foi desenvolvido contemplando as propostas descritas acima. O método da continuação foi utilizado como referência e os resultados obtidos nas duas metodologias propostas são comparados, com o objetivo de validar a eficiência dessas propostas.

Abstract

This thesis deals with the voltage stability problem in electric power systems. Several aspects are discussed, for example, basic concepts, components of power systems that affect voltage stability and voltage collapse phenomenon mechanisms. Some static analysis methods are presented, highlighting their goals which are: the operating point evaluation, the critical bus of power systems determination and the load margin to the voltage collapse point calculation.

Energy function methods and their applications to dynamic analysis of power systems are discussed, as well as the theoretical aspects of stability in physical systems and the Lyapunov function used in power systems. A brief description of methods to obtain the load flow low voltage solutions is also presented, considering their importance to the energy function technique in static analysis.

Then, the methodology proposed in this thesis is introduced. It deals with the energy function method used in voltage stability static analysis. In this case, only the potential energy is considered. The main goal of this methodology is to determine the load margin to the voltage collapse point of an electric power system; it also can be used to load shedding evaluation. With the help of an augmented load flow Jacobian, the energy function equations are incorporated into this matrix, in order to obtain, after the iterative process, a system energy value close to zero. The load flow equations are also incorporated into the Jacobian matrix, in order to calculate, at every load flow iteration, the low voltage solutions.

This work also proposes a method to calculate the power system low voltage solutions, solving a conventional load flow, with a reduced value of the voltage “guess” in the critical bus, as long as these solutions are used in the energy function equations.

Finally, the work shows the tests results performed in electric power systems, with a computational program developed using the proposed methods described above. A continuation method is used as a benchmark and the tests results of both methodologies are compared, in order to validate the efficiency of the methods proposed in this thesis.

Capítulo 1

ESTABILIDADE DE TENSÃO: CONCEITOS BÁSICOS

1.1 Introdução

Nas últimas duas décadas, o problema da estabilidade de tensão em sistemas de potência tem se tornado um tema de grande interesse para pesquisadores e engenheiros de planejamento e de operação de empresas de energia elétrica. Na medida em que os sistemas de potência têm operado sob condições cada vez mais freqüente de elevado carregamento, ficando susceptíveis a reduções na tensão, a capacidade de mantê-los estáveis, sob o ponto de vista de tensão, tem causado grande preocupação. Nesta situação, se ações de controle eficazes para aumentar o suprimento de potência reativa, e conseqüentemente os níveis de tensão, não forem implementadas, o contínuo crescimento da carga levará o sistema à instabilidade e até ao colapso de tensão. A instabilidade de tensão se caracteriza pelo afundamento das tensões em uma determinada área, ou em todo o sistema, durante períodos que variam de alguns segundos a até vários minutos. Algumas definições relacionadas ao assunto são apresentadas a seguir [1,2,3]:

- **Estabilidade de tensão**

Um sistema de potência, em um determinado ponto de operação, é estável sob o ponto de vista de tensão se, após ser submetido a um distúrbio, suas tensões são idênticas ou próximas aos valores de pré-distúrbio.

- **Instabilidade de tensão**

A instabilidade de tensão é o oposto da estabilidade de tensão e resulta em progressivos decréscimos de tensão.

- **Colapso de tensão**

Um sistema de potência, em um determinado ponto de operação e após ser submetido a um distúrbio, atinge o colapso de tensão, se os níveis de tensão pós-distúrbio permaneçam em valores abaixo de limites aceitáveis. Estes limites dependem do sistema e da carga. O colapso de tensão pode ser total ou parcial.

- **Segurança de tensão**

É a capacidade de um sistema de potência de não apenas operar de maneira estável, mas também de permanecer estável após uma contingência ou aumentos sucessivos de carga. Também significa a existência de uma margem de carga considerável entre um ponto de operação e o ponto de colapso, após ser submetido a um distúrbio.

Alguns incidentes envolvendo problemas de estabilidade de tensão em importantes sistemas elétricos aconteceram nas últimas décadas, conforme detalhados nas referências [2,4,5] que mostram que eles foram ocasionados por diversas razões. Assim, muitas discussões sobre a natureza do colapso de tensão têm sido travadas e o colapso de tensão tem sido associado a um ponto de bifurcação sela-nó [6].

Este capítulo aborda os conceitos básicos da estabilidade de tensão, a caracterização e a classificação do fenômeno da instabilidade de tensão, os fatores de influência e métodos de análise estática. Em seguida é apresentada toda a organização deste trabalho.

1.2 Relação entre Estabilidade de Tensão e Estabilidade Angular

Estabilidade de tensão e estabilidade angular são questões inter-relacionadas. Estabilidade de tensão transitória está sempre relacionada com a estabilidade angular transitória, enquanto que estabilidade de tensão de longo termo é menos associada à estabilidade angular. É difícil separar os mecanismos. No entanto, existem muitos casos em que uma forma de instabilidade predomina. A referência [1] mostra duas situações extremas:

- a) um gerador síncrono conectado por linhas de transmissão a um grande sistema (problema máquina - barra infinita), o que caracteriza um problema unicamente de estabilidade angular.
- b) um gerador síncrono ou um grande sistema conectado por linhas de transmissão a uma barra de carga, o que caracteriza um problema unicamente de estabilidade de tensão.

Estabilidade de tensão refere-se às áreas de carga e às características da carga, enquanto que a estabilidade angular está relacionada com a integração de remotas usinas com um grande sistema através de linhas de transmissão extensas. Por estas razões, estabilidade de tensão é basicamente "estabilidade associada à carga", enquanto que estabilidade angular é basicamente "estabilidade associada à geração".

Em um grande sistema interligado, um colapso de tensão em uma área de carga pode ocorrer sem perda de sincronismo em quaisquer geradores, próximos ou não. Pode-se dizer então que, um colapso de tensão em um ponto de um sistema de transmissão longe da área de carga é um problema de instabilidade angular. Se o colapso de tensão ocorre em uma área de carga, então provavelmente é um problema de instabilidade de tensão.

1.3 Análise Conceitual da Estabilidade de Tensão

Para ilustrar como a instabilidade de tensão se processa em um sistema de potência, é utilizado um sistema de duas barras, composto de um gerador alimentando uma carga através de uma linha de transmissão, como apresentado na Figura 1.1.

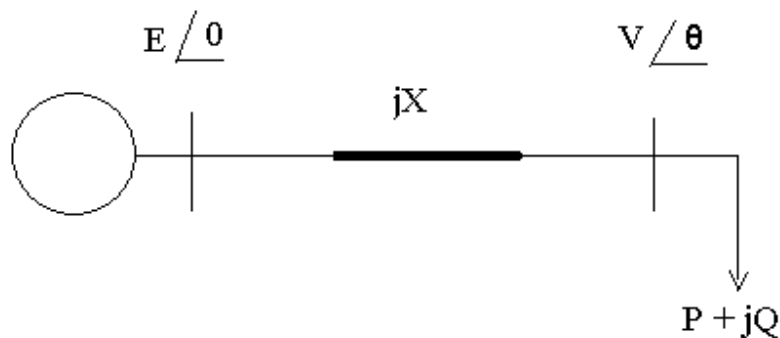


Figura 1.1: Sistema de duas barras

A característica da carga, que é do tipo potência constante, está representada juntamente com a curva PV do sistema, como mostrado na Figura 1.2. A intersecção da reta, que representa a característica da carga, com a curva PV são os pontos de operação do sistema, correspondendo a dois valores distintos de tensão. O ponto de operação na parte superior da curva é estável, pois um aumento de carga provoca a redução da tensão. O ponto na parte inferior da curva é instável, pois um aumento de carga eleva a tensão. Nesta região instável a corrente é elevada enquanto que a tensão é bastante reduzida. À medida que a carga aumenta, os dois pontos de operação vão se aproximando até se tornarem um único ponto, localizado na extremidade da curva PV. Este ponto é o limite de carregamento do sistema, ou ponto de colapso de tensão, também chamado de ponto de bifurcação. Neste ponto, a matriz Jacobiana do fluxo de carga torna-se singular, pois apresenta pelo menos um autovalor nulo [6,7,8,9,10].

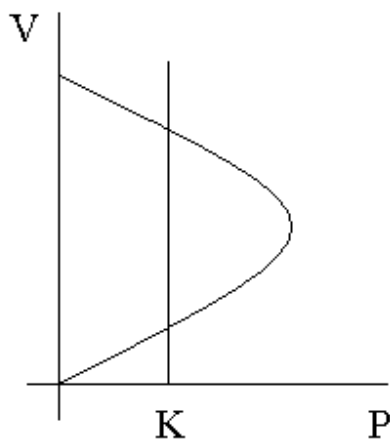


Figura 1.2: Curva PV

1.4 Caracterização do Fenômeno

Problemas de estabilidade de tensão normalmente ocorrem em sistemas muito carregados. Embora muitas sejam as causas que podem levar um sistema ao colapso de tensão, a questão fundamental é a inerente fragilidade deste sistema de potência [11].

O evento inicial que leva um sistema de potência ao colapso pode ser um aumento da carga, uma linha de transmissão muito carregada ou uma grande perturbação como uma perda de um gerador. O aspecto principal do problema é a incapacidade do sistema em atender a demanda de potência reativa [2].

O colapso de tensão geralmente se manifesta como um lento e contínuo declínio do nível de tensão em uma barra. É resultado de um processo que envolve as interações entre os dispositivos e seus controles, e depende da topologia e condições do sistema. Alguns fatores que contribuem para o problema são as grandes distâncias entre a geração e a carga, a operação de LTC em condições de baixo nível de tensão e determinadas características de carga.

1.5 Classificação de Estabilidade de Tensão

Estabilidade de tensão pode ser classificada em duas categorias: estabilidade de tensão devido a grandes distúrbios e devido a pequenos distúrbios. Estabelecer o tipo de fenômeno a ser estudado é fundamental para a escolha da ferramenta de análise.

Estabilidade de tensão devido a grandes distúrbios refere-se à capacidade do sistema de controlar suas tensões após grandes distúrbios, tais como faltas no sistema, perda de carga ou perda de geração. Este tipo de estabilidade de tensão deve ser estudado usando-se uma análise dinâmica e pode ser subdividida em transitória e de longo termo. Esta análise requer um modelo detalhado do sistema, incluindo as equações diferenciais dos geradores.

Estabilidade de tensão devido a pequenos distúrbios refere-se à capacidade do sistema de controlar suas tensões após pequenas perturbações, tais como mudanças graduais na carga. Um modelo detalhado do sistema também pode ser utilizado para analisar este fenômeno. Entretanto, sob certas condições, este tipo de estabilidade de tensão pode ser estudado através de uma análise estática, que utiliza as equações linearizadas do fluxo de carga em um determinado ponto de operação. Cabe ressaltar que apenas a análise estática será utilizada neste trabalho.

Os fenômenos de instabilidade e colapso de tensão estendem-se numa faixa de tempo que varia de uma fração de segundo até dezenas de minutos. Por isso pode-se classificar a estabilidade de tensão devido a grandes distúrbios em transitória e de longo termo.

A estabilidade de tensão transitória ocorre na faixa de até dez segundos e como exemplos têm-se: dinâmica de motores de indução e de geradores, chaveamentos de bancos de capacitores, alívio de carga, operação de compensadores estáticos, atuação de relés de proteção. A estabilidade de tensão de longo termo se situa entre dezenas de segundos a minutos e como exemplos têm-se: operação de termostatos, limite de

excitação, controle automático de geração (CAG), ação do operador de sistema/usina, sobrecarga de linha/transformador, atuação de relés de proteção [2,12,13].

1.6 Fatores de Influência na Estabilidade de Tensão

Os principais fatores que contribuem para o colapso de tensão são os limites de fornecimento de potência reativa dos geradores, características do sistema de transmissão, características das cargas, características dos dispositivos de compensação de potência reativa e a ação dos dispositivos de controle de tensão como os LTC de transformadores. A seguir são examinadas as características destes equipamentos que influenciam na estabilidade de tensão [1,11,14].

1.6.1 Geradores

Uma das maneiras mais eficazes de se ter um bom controle de tensão num sistema de potência é através dos reguladores de tensão dos geradores. Sob condições normais as tensões terminais dos geradores são controladas. No entanto, quando um sistema de potência opera sob condições de elevado carregamento, o fornecimento de potência reativa pelos geradores pode exceder os limites de corrente de campo e de armadura dos geradores. Neste caso, as tensões terminais não podem mais ser controladas, contribuindo então para um quadro de colapso de tensão. Em estudos de fluxo de potência os geradores podem ser representados com suas tensões terminais controladas, simulando o efeito de limitação da potência reativa pelos reguladores de tensão.

1.6.2 Sistema de Transmissão

Um aspecto fundamental de um sistema de transmissão é o seu balanço de potência reativa. Uma linha de transmissão tanto produz como consome potência reativa, e esta potência reativa líquida deve ser absorvida ou fornecida pelo sistema em cada terminal da linha. A capacitância “shunt” da linha produz potência reativa proporcional ao quadrado da tensão ($Q = V^2 B$). Como um sistema elétrico de potência opera com níveis de tensão em torno de $\pm 5\%$ da tensão nominal, a produção de potência reativa é

relativamente constante. A indutância série da linha de transmissão consome potência reativa proporcional ao quadrado da corrente ($Q = I^2X$). Como a corrente varia de acordo com o carregamento da linha, o consumo de potência reativa é variável. Portanto, a potência reativa líquida de uma linha de transmissão varia com seu ciclo de carga, sendo que o período de carga pesada é o mais crítico com respeito à estabilidade de tensão, tendo em vista que o consumo de potência reativa poderá ser elevado, provocando quedas de tensão e perdas elétricas [1,12,14].

Outra questão importante é que uma linha de transmissão longa e muito carregada não consegue transmitir potência reativa, mesmo com níveis elevados de tensão, o que é crítico sob o aspecto de estabilidade de tensão, pois não se tem uma boa compensação de potência reativa no ponto de carga.

1.6.3 Cargas

A operação estável de um sistema de potência depende da capacidade de seus geradores de suprir a demanda de carga. Conseqüentemente, as características das cargas têm uma importância muito grande na estabilidade de tensão do sistema.

A modelagem de carga é um fator complicador, uma vez que uma carga típica é composta por diferentes tipos de dispositivos, tais como lâmpadas fluorescentes e incandescentes, refrigeradores, compressores, motores, fornos, etc. A composição exata da carga é difícil de ser estimada. Além disto, a composição da carga depende também de outros fatores como dia, hora, condições climáticas e condições econômicas da região. Portanto, na representação das cargas em estudos de sistema, aplicam-se algumas simplificações necessárias e úteis. Os modelos de carga podem ser classificados em dois tipos: modelo estático e modelo dinâmico.

O modelo estático de carga expressa a característica da carga de uma barra para um determinado instante de tempo, como uma função algébrica da magnitude da tensão nesta barra, naquele instante. O componente de potência ativa P e o componente de

potência reativa Q são considerados isoladamente. Este modelo é usado para representar componentes essencialmente estáticos da carga, por exemplo, cargas de aquecimento e iluminação, e como uma aproximação para componentes dinâmicos da carga, como cargas acionadas por motores. Um modelo estático que tem sido largamente utilizado é o modelo polinomial, no qual as parcelas ativa e reativa da carga são expressas através das seguintes equações algébricas:

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \\
 Q &= Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right]
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

onde V é a magnitude da tensão na barra e o subíndice “0” indica os valores das respectivas variáveis na condição inicial de operação.

Os parâmetros deste modelo são os coeficientes p_1 , p_2 , p_3 e q_1 , q_2 , q_3 , que definem a proporção de cada componente. Este modelo é comumente chamado de modelo ZIP, pois ele é composto por componentes de impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P).

Cargas industriais, que são predominantemente do tipo potência constante, são mais críticas do ponto de vista de estabilidade de tensão, pois suas potências não variam significativamente com a tensão. Por outro lado, cargas residenciais, que são predominantemente do tipo impedância constante, são mais favoráveis do ponto de vista de estabilidade de tensão, pois suas potências sofrem redução sob situações de queda de tensão. No entanto, em lugares onde a utilização de condicionadores de ar é intensa, o tipo da carga residencial pode ser alterado.

O modelo dinâmico de carga expressa a característica da carga de uma barra em um determinado instante de tempo, como uma relação entre a magnitude da tensão da barra e o tempo observado. Cargas constituídas essencialmente por motores, onde a resposta a um distúrbio não ocorre instantaneamente, mas sim com um intervalo de tempo pré-determinado, exigem em sua representação uma equação da dinâmica da resposta temporal – uma equação diferencial.

1.6.4 Transformadores

A impedância de um transformador tem a mesma influência em um colapso de tensão que a impedância de uma linha de transmissão. Porém, um fator de muita importância no processo de instabilidade até o colapso de tensão é a comutação automática de taps (LTC).

Os LTC são usados para manter as tensões em níveis aceitáveis nas barras controladas. Por exemplo, se algum evento diminui o nível de tensão na barra controlada, a ação do LTC é restaurar a tensão para um nível aceitável. Em um sistema elétrico sobrecarregado, a ação do LTC tenderá a uma progressiva queda de tensão e, conseqüentemente levará o sistema à instabilidade de tensão e, finalmente, ao colapso [2,14].

1.6.5 Dispositivos de Compensação de Potência Reativa

A compensação de potência reativa é um modo eficiente de se melhorar a capacidade de transmissão de potência e a estabilidade de tensão de um sistema, pois fornece um suporte local de potência reativa. Como exemplos de dispositivos de compensação de potência reativa têm-se: capacitores *shunt*, capacitores série, compensadores estáticos e compensadores síncronos [1,14].

Capacitores *shunt* podem ser utilizados, até certo ponto, para aumentar o limite de estabilidade de tensão, corrigindo o fator de potência no terminal receptor. Podem também ser muito úteis na medida em que eles permitem que os geradores próximos operem com um fator de potência quase unitário. Isto aumenta a reserva de potência reativa ajudando a prevenir, em muitos casos, o colapso de tensão. No entanto, os capacitores *shunt* fornecem potência reativa proporcional ao quadrado da tensão, o que significa que em condições de operação com tensões reduzidas o suporte de potência reativa diminui, agravando o problema.

Os compensadores estáticos (SVC) propiciam uma regulação de tensão mais adequada com chaveamentos de bancos de capacitores. A tensão é regulada de acordo com a característica Q-V da barra controlada. A inclinação da curva Q-V é relacionada ao ganho em regime permanente e varia entre 1 a 5% da faixa de controle. Em seu limite capacitivo, o SVC torna-se um banco de capacitores *shunt*.

Os capacitores série têm sido tradicionalmente associados a linhas de transmissão longas e à melhoria da estabilidade transitória. Atualmente são também utilizados em linhas mais curtas para melhorar a estabilidade de tensão. A compensação série reduz a reatância indutiva e o ângulo da linha de transmissão.

Os compensadores síncronos (CS) proporcionam um aumento no fornecimento de potência reativa quando de uma redução no nível de tensão do sistema. A subsequente diminuição da tensão interna ou fluxo (reação de armadura) é compensada pelo controle da excitação. Os CS podem suportar uma sobrecarga por dezenas de segundos. Um sistema com compensação síncrona tem tensões críticas menores no ponto de máxima potência. Os CS aumentam a potência de curto-circuito de um sistema, tornando-o mais forte.

1.7 Análise Estática

A análise estática da estabilidade de tensão de um sistema de potência requer o exame dos seguintes aspectos [11]:

- 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 área/barra crítica do sistema de potência, visto que o problema é reconhecido como um problema local;
- A margem de carga entre o ponto de operação conhecido e o ponto de colapso de tensão. Isto implica no conhecimento de um método que identifique este ponto de colapso de tensão.

Este trabalho foca esses três aspectos, na medida em que, a partir do conhecimento da barra crítica, determina-se a solução instável de interesse. Logo, os dois primeiros aspectos são obtidos quase que simultaneamente, visto que a existência da solução estável de interesse implica a estabilidade de tensão do ponto analisado. Através desta solução, busca-se, com o auxílio da proposta deste trabalho, a determinação da margem de carga, obtendo-se, em seguida, o terceiro aspecto citado.

1.8 Organização do Trabalho

O principal objetivo deste trabalho é propor e implementar uma técnica de análise estática que pode ser utilizada na obtenção da margem de carga de um sistema de potência, entre o ponto de operação conhecido e o ponto de colapso de tensão. Com esse intuito, utiliza-se a técnica da função energia e a matriz Jacobiana estendida do fluxo de carga. A idéia é incorporar na matriz Jacobiana as equações da função energia – de modo a se obter, ao final do processo iterativo, um valor próximo a zero para a energia final do sistema – e as equações do fluxo de carga, que são necessárias para a obtenção das soluções instáveis do sistema de potência a cada iteração do processo.

Neste trabalho um método para o cálculo das soluções instáveis de um sistema elétrico de potência também é proposto, dado que estas soluções são necessárias nas equações da função energia. A questão fundamental é encontrar uma boa estimativa inicial para que o método convirja para a solução instável. Esta questão é solucionada identificando-se antecipadamente a barra crítica do sistema através do método do vetor tangente. A partir da identificação da barra crítica, inicia-se uma iteração de Newton-Raphson com uma estimativa de valor reduzido para a tensão na barra crítica, considerando que a área onde se localiza a barra crítica converge para a solução instável crítica, com um valor reduzido de tensão e com o menor valor de energia.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2 apresenta as bifurcações que podem ser identificadas em um sistema elétrico de potência e algumas técnicas de análise estática para identificação do ponto de colapso. Em seguida é apresentada a técnica da função energia. O Capítulo 3 discute alguns conceitos básicos sobre estabilidade em sistemas físicos, bem como os modelos matemáticos que os descrevem. Em seguida, são apresentados os teoremas de Lyapunov e, resumidamente, o uso da metodologia de função energia nos estudos de estabilidade transitória. Após, é focado o método de função energia na análise de estabilidade de tensão, que é o principal objetivo no desenvolvimento deste trabalho. O Capítulo 4 é dedicado à definição e aos métodos de cálculo das soluções instáveis de um sistema elétrico de potência. A seguir, um método para o cálculo destas soluções é proposto. O Capítulo 5 mostra algumas aplicações que utilizam o auxílio de uma matriz Jacobiana estendida e, em seguida, nossa proposta é apresentada, que é a incorporação na matriz Jacobiana das equações da função energia e das equações do fluxo de carga. O Capítulo 6 mostra os resultados do método proposto, comparando-os com o método da continuação. Finalmente, o Capítulo 7 trata das conclusões do trabalho e das perspectivas futuras.

Capítulo 2

MÉTODOS DE ANÁLISE ESTÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARGA E DO PONTO DE COLAPSO DE TENSÃO

2.1 Introdução

Em análise de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência procura-se determinar, para um ponto operativo do sistema, o montante de carga capaz de levá-lo ao colapso – sua margem de carga. Esta margem de carga é um índice de segurança do sistema, uma vez que a "distância" ao ponto de bifurcação é, então, conhecida. A teoria das bifurcações é uma ferramenta muito útil para a identificação deste ponto [6,9,15,16]. Alguns tipos de bifurcação podem ser encontrados em sistemas elétricos de potência, associados à modelagem matemática utilizada.

Devido à importância da teoria das bifurcações para os estudos de estabilidade de tensão e para facilitar a compreensão quanto à análise do fenómeno, este capítulo aborda as bifurcações que podem ser identificadas utilizando-se o modelo de fluxo de carga. São abordadas também algumas técnicas de análise estática úteis na identificação do ponto de colapso. Em seguida é apresentada a técnica da função energia, utilizada neste trabalho.

2.2 Bifurcações em Sistemas Elétricos de Potência

A teoria das bifurcações permite associar a metodologia matemática com o processo de instabilidade de tensão [6]. O estudo do comportamento da solução de um sistema de equações não lineares pode ser obtido através da teoria das bifurcações. As análises das bifurcações requerem que o modelo do sistema seja especificado na forma de equações que contenham variáveis de estado e parâmetros. Um diagrama de bifurcação mostra a mudança de uma solução em consequência de variações em parâmetros do sistema. Em sistemas elétricos de potência tem-se, como exemplo, o comportamento da tensão de uma barra (variável de estado) em função do aumento do carregamento (parâmetro). De todos os tipos de bifurcação, as bifurcações tipo sela-nó, limite-induzidas e de Hopf são as mais comumente encontradas em estudos de estabilidade de tensão. Para um modelo estático de sistema as bifurcações sela-nó e limite-induzidas podem ser encontradas. A bifurcação do tipo limite-induzidas ocorre quando os geradores do sistema atingem os seus limites de potência reativa. A bifurcação sela-nó ocorre quando um dos autovalores associados à matriz Jacobiana do fluxo de carga torna-se nulo, ou seja, a matriz Jacobiana neste ponto de operação é singular. Este tipo de bifurcação pode ser descrito pela equação (2.1):

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

Na equação (2.1) acima, λ é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro. Os pontos de equilíbrio da equação acima definem uma parábola, desde que $\lambda \geq 0$. Para $\lambda > 0$ existem duas soluções: $+\sqrt{\lambda}$, que é o ponto de equilíbrio estável, e $-\sqrt{\lambda}$, que é o ponto de equilíbrio instável. Para $\lambda = 0$, existe apenas uma solução, que é o ponto de bifurcação e para $\lambda < 0$ não há solução. A matriz Jacobiana para o sistema (2.1) acima é dada por:

$$J = -2x \quad (2.2)$$

A partir da análise da matriz Jacobiana pode-se avaliar a estabilidade ou não do sistema. Assim, para $x < 0$, tem-se um autovalor positivo e o sistema é instável; para $x > 0$, tem-se um autovalor negativo e o sistema é estável. As seguintes características da bifurcação sela-nó podem ser identificadas: duas soluções tornam-se única no ponto de bifurcação, um autovalor nulo é obtido no ponto de bifurcação e após esse ponto não há solução.

Outra característica importante da bifurcação sela-nó é que, caso o elemento da matriz Jacobiana associado à maior entrada do autovetor à direita seja removido, a nova matriz Jacobiana não é mais singular. Este é um aspecto importante para o método da continuação, que será abordado neste trabalho.

A Figura 2.1 mostra o diagrama de bifurcação, que apresenta o comportamento da variável de estado x em função do parâmetro de bifurcação λ . A linha cheia representa o ramo estável e a linha tracejada representa o ramo instável. Em $(0,0)$, tem-se um autovalor nulo (ponto de bifurcação).

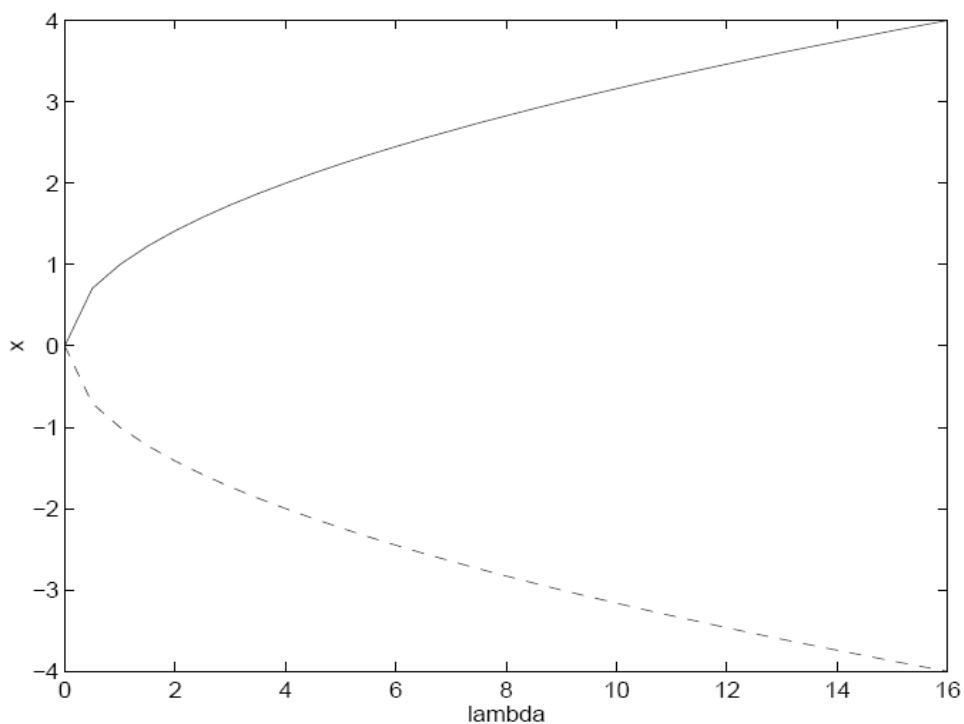


Figura 2.1 – Diagrama de bifurcação sela-nó

Além das características apresentadas anteriormente, a bifurcação sela-nó obedece ainda às seguintes condições de transversalidades [6]:

– Condição 1

Seja $f_x(x_0, \lambda_0)$, que possui um autovalor nulo com autovetor à direita v e à esquerda w , tal que:

$$D_x f|_0^T w = D_x f|_0 v = 0 \quad (2.3)$$

– Condição 2

$$w^T \frac{\partial f}{\partial \lambda}|_0 \neq 0 \quad (2.4)$$

– Condição 3

$$w^T [D_x^2 f|_0 v] \neq 0 \quad (2.5)$$

A bifurcação de Hopf é caracterizada pela existência de um par de autovalores complexos com parte real nula da matriz Jacobiana dinâmica [6]. Sendo assim, a dinâmica do sistema é alterada de uma condição de equilíbrio para uma condição oscilatória, estável ou não. Para a identificação da bifurcação de Hopf, um modelo dinâmico de sistema deve ser usado. É possível se encontrar este tipo de bifurcação em sistemas de potência, desde que seja utilizado um modelo algébrico-diferencial.

É importante enfatizar que a literatura apresenta uma variedade de bifurcações possíveis de serem identificadas em sistemas dinâmicos. Em sistemas de potência, no entanto, as bifurcações do tipo sela-nó, limite-induzidas e de Hopf são as mais evidentes e caracterizadas. Para o modelo estático utilizado neste trabalho, apenas as bifurcações do tipo sela-nó e limite-induzidas são encontradas.

2.3 Método da Decomposição da Matriz Jacobiana em Autovalores

Este método consiste, para um dado ponto operativo do sistema, obtém-se uma direção de crescimento de carga até que o ponto de colapso seja alcançado. À medida que se aumenta o carregamento do sistema, o menor autovalor associado ao ponto operativo tornar-se-á nulo no ponto de colapso. Este fato faz com que a monitoração do menor autovalor seja importante.

Para cada ponto de operação obtido, calcula-se o menor autovalor e os autovetores associados da matriz Jacobiana reduzida J_{QV} do fluxo de carga, matriz esta que retém as relações Q - V do sistema, pois o foco do problema são as características associadas à potência reativa e à tensão. Seja a matriz Jacobiana do fluxo de carga:

$$J = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

A matriz Jacobiana reduzida J_{QV} é então obtida [13]:

$$J_{QV} = [D - CA^{-1}B] \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} [\Delta Q] &= [J_{QV}] [\Delta V] \\ [\Delta V] &= [J_{QV}]^{-1} [\Delta Q] \end{aligned} \quad (2.7)$$

A referência [10] mostra que a matriz Jacobiana reduzida J_{QV} é quase simétrica. Portanto a decomposição por autovalores ou valores singulares é facilmente obtida.

Os autovalores da matriz Jacobiana identificam os diferentes modos através dos quais o sistema pode se tornar instável. Os autovetores fornecem informações relacionadas com o mecanismo da instabilidade de tensão.

Após a obtenção de todos os pontos, um gráfico do menor autovalor de cada ponto em função da carga é traçado. O comportamento deste gráfico indica se é possível estimar o ponto de colapso de tensão a partir de um determinado ponto de operação. Se este gráfico tiver um comportamento linear ou quadrático, pode-se determinar o ponto de colapso a partir de dois ou três pontos de operação conhecidos. É apresentada, a seguir, uma descrição da decomposição de matrizes por autovalores.

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

$$A = X\Lambda Y^T = \sum_{i=1}^n x_i \lambda_i y_i^T \quad (2.8)$$

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

Aplicando-se a decomposição em autovalores à matriz Jacobiana reduzida J_{QV} , tem-se que:

$$J_{QV} = X\Lambda Y^T \quad (2.9)$$

$$J_{QV}^{-1} = X\Lambda^{-1}Y^T \quad (2.10)$$

Das equações (2.7) e (2.10) obtém-se:

$$\Delta V = X\Lambda^{-1}Y^T \Delta Q = \sum_{i=1}^n x_i \lambda_i^{-1} y_i^T \Delta Q \quad (2.11)$$

Cada autovalor λ_i e os correspondentes autovetores à direita e à esquerda, x_i e y_i , definem o i -ésimo modo do sistema. Portanto, para o i -ésimo modo tem-se que as variações de tensão e potência reativa são dadas por:

$$\Delta V_i = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_i \quad (2.12)$$

Assumindo-se que os autovalores da matriz A sejam na forma $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n$, e que o autovalor λ_n seja muito próximo de zero, isto é, a matriz A é singular. Assim, para um sistema elétrico de potência, a matriz A é representada pela matriz Jacobiana J , então:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [x \lambda y^T] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [x \lambda^{-1} y^T] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Considerando um ponto próximo ao ponto de colapso, a última coluna de y (associada ao autovalor nulo) seja dada por $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$, tem-se que:

$$y_n = x_n \lambda_n y_n^T \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = x_n \lambda_n^{-1} (y_n^T y_n) \quad (2.16)$$

Como os autovetores são ortonormais, isto é, $y y^T = I$, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = x_n \lambda_n^{-1} \quad (2.17)$$

O autovetor à direita está associado à sensibilidade de tensão e ângulo, enquanto que o autovetor à esquerda está associado à sensibilidade de injeção de potências ativa e reativa. Assim, próximo ao ponto de colapso, o maior componente no autovetor à direita, associado ao menor autovalor, indica a barra mais sensível às variações de tensão e ângulo, isto é, a que mais fortemente direciona o sistema à singularidade. O maior componente no autovetor à esquerda, associado ao menor autovalor, indica a barra mais sensível às variações de injeção de potências ativa e reativa [6,17].

2.4 Método do Vetor Tangente

A determinação do vetor tangente e sua aplicação para avaliação de estabilidade de tensão são mostradas a seguir [6,18,19,20]. O modelo de fluxo de carga utilizado neste trabalho é representado pelo seguinte conjunto de equações algébricas:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (2.18)$$

Onde λ é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio estável para outro e x representa as variáveis de estado. O vetor tangente mostra como as variáveis de estado se modificam com o carregamento. Seja o sistema linearizado de equações representado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Onde J é a matriz Jacobiana do fluxo de carga, o vetor ΔP contém os incrementos de potência ativa, o vetor ΔQ contém os incrementos de potência reativa e os vetores $\Delta \theta$ e ΔV contêm, respectivamente, as correspondentes variações incrementais nos ângulos e módulos das tensões nodais. A partir da equação 2.19, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

O aumento de carga é obtido da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} P &= P_0(1 + \Delta\lambda) \\ Q &= Q_0(1 + \Delta\lambda) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P - P_0 = P_0 \Delta\lambda \\ \Delta Q &= Q - Q_0 = Q_0 \Delta\lambda \end{aligned} \quad (2.22)$$

Onde P e Q são as cargas ativa e reativa após a variação do parâmetro λ , e P_0 e Q_0 são as cargas ativa e reativa iniciais. Assim sendo, a Equação 2.20 torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \Delta\lambda \quad (2.23)$$

E, finalmente, tem-se o vetor tangente:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Observa-se, a partir do conjunto de equações anteriores, o pequeno esforço computacional necessário para o cálculo do vetor tangente, pois o cálculo do vetor tangente é obtido a partir do fluxo de carga convergido e das cargas iniciais do sistema. Uma vez obtido o vetor tangente, a maior entrada (o maior componente em módulo) deste vetor está associada à

variável mais sensível à variação de carga, e a barra à qual esta variável estiver relacionada é considerada a barra crítica do sistema, sob o ponto de vista da estabilidade de tensão. As referências [18,20] mostram que a barra crítica é identificada com o sistema ainda longe do ponto de bifurcação. No entanto, alguns sistemas podem apresentar, em função do esgotamento de importantes fontes de potência reativa, uma alteração de barra crítica ao longo da mudança lenta do carregamento (parâmetro). Todavia, este vetor de sensibilidade apresenta um comportamento mais robusto e confiável do que outros índices comumente empregados para esta identificação. É importante ressaltar que cada barra de carga tem duas entradas no vetor tangente, uma associada ao ângulo de fase e outra ao nível de tensão. Outro ponto relevante é que o vetor tangente converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo no ponto de singularidade, conforme mostra a referência [21].

O método do vetor tangente também pode ser aplicado à matriz Jacobiana reduzida J_{QV} . Neste caso, de maneira semelhante à usada para o caso da matriz Jacobiana, o vetor tangente pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = [J_{QV}]^{-1} [Q_0] \quad (2.25)$$

A referência [20] mostra que o vetor tangente apresenta-se bem comportado em ambos os casos: matriz Jacobiana completa do sistema ou matriz Jacobiana reduzida J_{QV} . Nota-se que, devido ao comportamento quadrático do vetor tangente [19] o ponto de colapso pode ser identificado com antecedência.

2.5 Método da Continuação

De acordo com o que já foi discutido anteriormente, a matriz Jacobiana do fluxo de carga torna-se singular no ponto de colapso, isto é, não se consegue obter a inversa desta matriz. Portanto, à medida que se aproxima o ponto de bifurcação, a matriz Jacobiana torna-se mal condicionada e o sistema de equações lineares pode não ter solução. Neste caso, o fluxo de carga convencional não é suficiente para a determinação do ponto de colapso. Este problema pode ser resolvido com o emprego do método da continuação. Este método consiste em traçar o diagrama de bifurcação a partir de sucessivos incrementos de carga, de forma linear para todas as barras do tipo PQ, obtendo-se então informações quanto à margem de carga deste sistema e o ponto de colapso.

Várias referências [16,22,23,24] apresentam o método da continuação e suas aplicações. Este método consegue traçar todo o diagrama de bifurcação, inclusive a região instável, pois se utiliza de técnicas que evitam a singularidade da matriz Jacobiana. O método é dividido em três fases: passo previsor, passo corretor e parametrização da matriz Jacobiana.

- a) Passo previsor: a partir de uma direção de crescimento de carga ($\Delta\lambda$) – obtida pelo vetor tangente, que mostra como as variáveis de estado se comportam a partir de uma variação lenta de carga – encontram-se os novos incrementos das variáveis de estado (Δx);
- b) Passo corretor: corrige os valores das variáveis de estado, obtidas no passo previsor, resolvendo $f(x, \lambda) = 0$, encontrando um novo ponto de equilíbrio.
- c) Parametrização da matriz Jacobiana: à medida que o sistema se aproxima do ponto de bifurcação, uma substituição de variáveis torna-se necessária para a obtenção da solução, removendo a singularidade da matriz Jacobiana. Esse processo consiste na utilização de um parâmetro de solução em substituição à variável mais sensível à convergência do método iterativo.

2.6 Método Direto

O método direto encontra o ponto de bifurcação (x_0, λ_0) sem, traçar o diagrama de bifurcação. Desde que o ponto de colapso não pode ser identificado a partir do processo iterativo do fluxo de carga convencional, devido à singularidade da matriz Jacobiana, o método direto consiste em achar iterativamente o ponto de colapso através do método de Newton-Raphson modificado [6,21]. A modificação para permitir a solução consiste em agregar ao conjunto de equações do fluxo de carga, as equações que caracterizam o ponto de bifurcação. Portanto, o método direto pode ser equacionado da seguinte forma:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (2.26)$$

$$D_x f(x, \lambda)v = 0 \quad (2.27)$$

$$\|v\| \neq 0 \quad (2.28)$$

Onde λ é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio estável a outro, x representa as variáveis de estado e v o autovetor à direita. A primeira equação (2.26) representa o diagrama de bifurcação, a segunda equação (2.27) representa a imposição de singularidade e a terceira equação (2.28) garante que o autovetor obtido na equação (2.27) seja não nulo, isto é, a solução seja não trivial. Portanto, o sistema de equações tem dimensão $2n + 1$.

O método direto identifica corretamente o ponto de colapso, porém requer uma boa estimativa inicial para obter convergência, isto é, necessita do conhecimento de um ponto de operação próximo a (x_0, λ_0) . A estimativa inicial para v pode ser obtida pelo vetor tangente associado ao primeiro ponto de operação. Podem ocorrer também problemas quando os limites de geração de potência reativa são considerados, uma vez que a estrutura da matriz Jacobiana se modifica de acordo com o carregamento do sistema.

2.7 Técnica da Função Energia

Os métodos de função energia foram inicialmente empregados em sistemas de potência em análises de estabilidade transitória [25,26,27,28]. Esses métodos são baseados nos teoremas de Lyapunov e consistem em avaliar a energia total (cinética e potencial) de um sistema de potência durante um distúrbio. Em estudos de estabilidade transitória, existe o interesse de se determinar o tempo crítico de abertura de disjuntores para eliminação do distúrbio, de modo que o sistema se mantenha estável. Para isso, é necessário que a energia máxima do sistema, acumulada durante o período da falta, seja igual à energia do sistema após a falta. Esta metodologia determina o tempo crítico de abertura para o qual o sistema se mantém estável.

A utilização do método de função energia para a análise de estabilidade de tensão é mais recente e também pode produzir resultados interessantes [29,30,31,32]. Neste caso, apenas a energia potencial do sistema é necessária, dispensando a inclusão do amortecimento e dos modelos complexos dos geradores. Conceitualmente, a aplicação da função energia em análises de estabilidade de tensão baseia-se na medida de diferença de energia entre a solução estável e a solução instável. De acordo com resultados apresentados em [29,30,31,32], essa diferença de energia é um bom indicativo da distância do sistema até o colapso de tensão. À medida que aumenta o carregamento do sistema, a distância entre as soluções estável e instável se reduz e a energia do sistema decresce. No ponto de colapso, as soluções estáveis e instáveis tornam-se uma só e a energia do sistema tende a zero. Este comportamento quase linear da energia possibilita, de qualquer ponto de operação, uma boa estimativa da distância até o ponto de colapso e, conseqüentemente, a obtenção de informações a respeito da margem de carga do sistema.

Após a discussão dos principais métodos de análise estática utilizados nos estudos de estabilidade de tensão, o próximo capítulo aborda, de forma mais detalhada, a técnica da função energia que, combinada com o método direto, é parte da metodologia proposta neste trabalho.

Capítulo 3

MÉTODOS DE FUNÇÃO ENERGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

3.1 Introdução

Este capítulo aborda primeiramente alguns conceitos básicos de estabilidade, bem como os modelos matemáticos que descrevem um sistema físico. Em seguida, são apresentados os teoremas de Lyapunov e a utilização dos métodos de função energia em estudos de estabilidade angular transitória. Finalmente, foca-se na utilização do método de função energia em análise de estabilidade de tensão e na determinação das soluções instáveis do fluxo de carga, que são os principais objetivos no desenvolvimento deste trabalho.

3.2 Definições de Estabilidade

Os sistemas físicos são descritos através de modelos matemáticos, com a finalidade de análise. As equações a seguir descrevem alguns dos modelos possíveis de sistemas, onde x representa as variáveis de estado, u representa as variáveis de entrada e t representa a variável independente tempo [6,25,26]:

• $\dot{x} = f(x, u, t) \rightarrow$ sistema não linear, forçado e variante no tempo;

• $\dot{x} = f(x, t) \rightarrow$ sistema não linear, não forçado e variante no tempo;

• $\dot{x} = f(x, u) \rightarrow$ sistema não linear, forçado e invariante no tempo;

• $\dot{x} = f(x) \rightarrow$ sistema não linear, não forçado e invariante no tempo.

O sistema representado pela equação $\dot{x} = f(x)$ é conhecido como um sistema autônomo. Neste tipo de sistema, o comportamento dinâmico depende exclusivamente do estado do sistema. Uma vez conhecida a condição inicial, conhece-se todo o comportamento futuro deste sistema [33]. Os sistemas elétricos de potência são sistemas autônomos e, por conseguinte, toda a abordagem deste trabalho é restrita a tais sistemas.

Seja o sistema autônomo $\dot{x} = f(x)$ e x^* um ponto de equilíbrio. Pode-se, então, definir os seguintes critérios de estabilidade para um sistema autônomo [33]:

Estabilidade: Um ponto de equilíbrio x^* é estável se, dado $\varepsilon > 0$ suficientemente pequeno, existir um $\delta > 0$ dependendo de ε , tal que, para todo ponto inicial x_0 satisfazendo $|x_0 - x^*| < \delta$, a solução $\phi(t)$ com $\phi(t_0) = x_0$ satisfaz $|\phi(t) - x^*| < \varepsilon$ para $t \geq t_0$.

Isto quer dizer que, um ponto de equilíbrio é estável se, e somente se, toda solução iniciando numa vizinhança desse ponto de equilíbrio não se afasta significativamente deste ponto, conforme pode ser observado na Figura 3.1

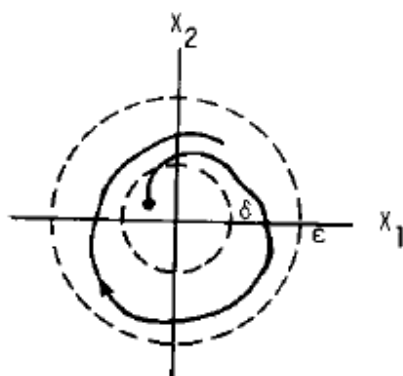


Figura 3.1 – Ponto de equilíbrio estável

Estabilidade Assintótica: Um ponto de equilíbrio é dito ser assintoticamente estável se, toda solução iniciando numa vizinhança do ponto de equilíbrio converge para este ponto de equilíbrio quando $t \rightarrow \infty$, ou seja, $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = x^*$, de acordo com o observado na Figura 3.2.

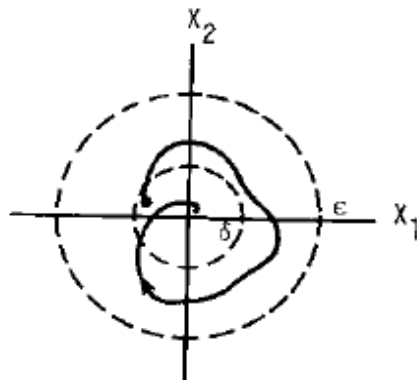


Figura 3.2 – Ponto de equilíbrio assintoticamente estável

Estabilidade Assintótica ao Extremo: Um ponto de equilíbrio é dito ser assintoticamente estável ao extremo se, toda solução iniciando em qualquer ponto do espaço de estados converge para este ponto de equilíbrio quando $t \rightarrow \infty$, conforme apresentado na Figura 3.3.

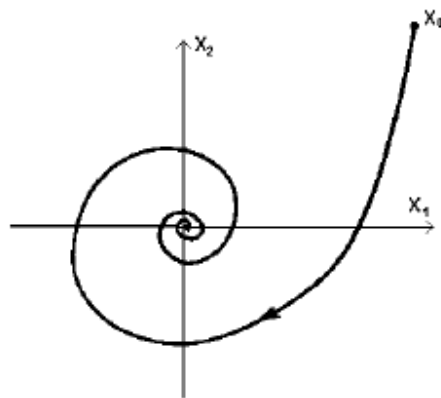


Figura 3.3 – Ponto de equilíbrio assintoticamente estável ao extremo

Nota-se que as definições de estabilidade são bastante precisas, porém são conceitos locais, pois não especificam as dimensões das vizinhanças. Em sistemas não lineares, a existência de um ponto de equilíbrio estável não garante que qualquer condição inicial produza trajetórias estáveis, mas somente para as condições iniciais contidas em uma região em torno do ponto de equilíbrio. Essa região é denominada de *região de estabilidade* ou *área de atração*. A determinação dessa região é o grande problema a ser resolvido nos estudos de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência.

3.3 Método de Lyapunov

Estudos de estabilidade transitória, através de simulações no domínio do tempo, calculam a resposta no tempo de todas as variáveis de estado de um sistema elétrico de potência. Esses métodos produzem resultados eficazes, porém são apresentadas respostas do tipo instável/estável, não fornecendo informações qualitativas sobre o comportamento do sistema. Conseqüentemente, a necessidade de se determinar o grau de estabilidade de um sistema não linear é um objetivo de grande importância para os pesquisadores. Neste sentido, o método de Lyapunov tem se mostrado eficiente para lidar com o problema de estabilidade [25,26]. Ele propõe duas abordagens para esta questão, conhecidas como “o primeiro método” e “o segundo método” ou “método direto” de Lyapunov. A diferença entre eles é que o “primeiro método” precisa encontrar soluções aproximadas para as equações diferenciais, enquanto que no “segundo método” este conhecimento não é necessário. Isto é uma grande vantagem no caso de sistemas não lineares. Além de estudar a estabilidade de pontos de equilíbrio, o “método direto” fornece um caminho para estimar a área de atração. Este método se baseia no seguinte raciocínio [25,26]: “se a relação $\frac{dE}{dt}$ da energia $E(x)$ de um sistema físico isolado é negativa para todo estado possível x , exceto para um único estado de equilíbrio estável x_e , então a energia decrescerá continuamente até atingir seu valor mínimo $E(x_e)$.” Se, para esse sistema, for possível encontrar uma função escalar $V(x)$ tal que ela seja sempre positiva, exceto para $x = x_e$, onde é zero, e sua derivada

$V(x) < 0$, exceto para $x = x_e$, onde é zero, então o sistema retorna ao ponto x_e ao sofrer um distúrbio. A função $V(x)$ é denominada função de Lyapunov.

As funções de Lyapunov foram inicialmente utilizadas em análises de estabilidade transitória de sistemas de potência [28]. Nesse contexto, um grande distúrbio é aplicado ao sistema, fornecendo-lhe uma energia inicial. Se esta energia for menor do que a energia do ponto de equilíbrio instável (u.e.p.) de menor energia do sistema pós-falta, o sistema retornará para o ponto de equilíbrio pós-falta. O método pode ser explicado fazendo-se a analogia de uma bola no fundo de um poço, conforme mostrado na Figura 3.4.

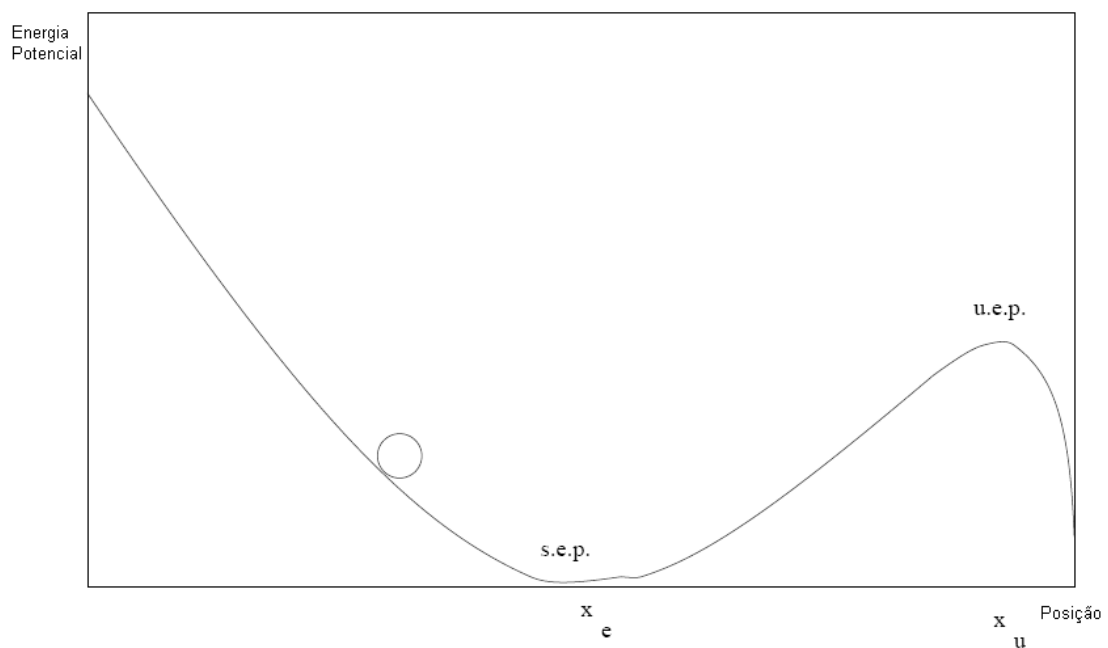


Figura 3.4 – Poço de energia

O poço tem um ponto de equilíbrio assintoticamente estável (s.e.p.) x_e no ponto de mínimo da função de energia potencial, e um u.e.p. x_u no ponto de máximo. Assume-se que a bola está inicialmente no ponto x_e e é deslocada deste ponto por um distúrbio. O problema é determinar se, após o distúrbio, a bola retornará ao s.e.p. Neste exemplo, o ponto máximo que a bola poderá alcançar é o ponto associado àquele de mesma energia que o ponto x_u .

Lyapunov estabeleceu alguns teoremas relacionados à estabilidade, enunciados a seguir após algumas definições importantes [33].

Definição: A função escalar $V(x)$ é dita ser definida positiva num conjunto Ω se, e somente se, $V(0) = 0$ e $V(x) > 0$ para todo $x \neq 0$ e $x \in \Omega$.

Definição: A função escalar $V(x)$ é dita ser definida negativa num conjunto Ω se $-V(x)$ é definida positiva.

Definição: Um conjunto B é dito ser invariante em relação ao sistema $\dot{x} = f(x)$, se toda solução deste sistema, começando em B, permanece em B por todo o tempo. Alguns exemplos de conjuntos invariantes: a união de pontos de equilíbrio, órbitas e a área de atração.

Teorema da Estabilidade: Se existir uma função escalar $V(x) > 0$ na vizinhança da origem, tal que $\dot{V}(x) \leq 0$ nessa região, então a origem é estável.

Teorema da Estabilidade Assintótica: Se existir uma função escalar $V(x) > 0$ na vizinhança da origem, tal que $\dot{V}(x) < 0$ nessa região, então a origem é assintoticamente estável.

Teorema da Região de Estabilidade Assintótica: Considere $V(x)$ uma função escalar e $\dot{V}(x)$ sua derivada ao longo das trajetórias do sistema $\dot{x} = f(x)$, $f(0) = 0$. Designa-se Ω uma região limitada onde $V(x) > 0$ e $\dot{V}(x) < 0$. Então a origem é assintoticamente estável e todas as trajetórias partindo em Ω convergem para a origem quando $t \rightarrow \infty$.

3.4 Função de Lyapunov para Sistemas Elétricos de Potência

Uma dificuldade para a aplicação do método de Lyapunov em sistemas elétricos de potência é a inexistência de procedimentos sistemáticos para encontrar uma função de Lyapunov. Para esses sistemas só é possível construir uma função de Lyapunov se algumas simplificações forem assumidas, como, por exemplo, desconsiderar as condutâncias de transferência nas equações da rede [25,34]. Caso as condutâncias de transferência sejam consideradas [35,36], a função não satisfaz as condições do Teorema 3.1 para ser uma função de Lyapunov. A abordagem mais comum, que considera as condutâncias de transferência, é a integração numérica do termo da função que é uma integral dependente do caminho [27]. Esta abordagem – chamada de método da função energia transitória (TEF) – não guarda as propriedades da função de Lyapunov, porém apresenta resultados práticos aceitáveis. Portanto, este método utiliza uma função energia transitória (TEF) em que o termo, que é uma integral dependente do caminho, é determinado por integração numérica.

Uma das maneiras de se obter uma função energia é baseada na combinação linear das primeiras integrais das equações do sistema. A existência da primeira integral pode ser considerada como sendo a própria definição de um sistema conservativo [33]. Por sua vez, a primeira integral baseia-se na idéia original de Lyapunov de que a energia total, no caso de um sistema conservativo, define a estabilidade de um ponto de equilíbrio. Não existem métodos gerais para se construir as primeiras integrais, exceto para sistemas de segunda ordem [26].

Considere-se o sistema $\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$, ou seja,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x), \\ f(0) &= 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Define-se como a primeira integral desse sistema uma função diferenciável $G(x_1, x_2, \dots, x_n)$, de modo que, quando os valores de x_i 's constituem uma solução, $G(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é igual a um valor C constante. Uma condição necessária e suficiente para a existência da primeira integral do sistema definido pela equação (3.1) é dada por:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.2}$$

Exemplo:

Seja o sistema o sistema de equações a seguir,

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{3.3}$$

$$\dot{x}_2 = -4x_1^3 - 4x_1 \tag{3.4}$$

Pode-se verificar que a condição imposta pela equação (3.2) é satisfeita. Manipulando as equações acima tem-se que:

$$\frac{dx_1}{dx_2} = \frac{x_2}{-4x_1^3 - 4x_1} \tag{3.5}$$

Multiplicando e integrando obtém-se:

$$G(x_1, x_2) = \frac{x_2^2}{2} + x_1^4 + 2x_1^2 \quad (3.6)$$

que é a primeira integral do sistema. Sendo $\dot{G}(0,0) = 0$ e $G(x_1, x_2)$ definida positiva na vizinhança da origem, esta é uma função de Lyapunov e a origem é estável.

Ao se aplicar o método da primeira integral para encontrar uma função energia para os sistemas de potência, faz-se uma associação com o critério das áreas iguais. Considere um sistema constituído de uma máquina síncrona conectada a uma barra infinita. A equação de oscilação dessa máquina, desprezando-se o amortecimento, é dada por:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P - P_e \sin \delta \quad (3.7)$$

Onde $P_e \sin \delta = \frac{E_1 E_2}{X_{eq}} \sin \delta$ é a potência elétrica fornecida pela máquina e $P = P_m - E_1^2 G_{11}$,

sendo P_m a potência mecânica aplicada ao eixo da máquina, E_1 a magnitude da tensão interna da máquina, E_2 a magnitude da tensão da barra infinita, G_{11} a condutância própria interna da máquina e X_{eq} a reatância equivalente do sistema entre o nó interno da máquina e a barra infinita. As soluções da equação (3.7) são dadas por:

$$P - P_e \sin \delta = 0 \quad (3.8)$$

As soluções da equação (3.8) no intervalo $[-\pi, \pi]$ são:

$$\text{a) } \delta = \delta^s = \sin^{-1} \frac{P}{P_e}$$

$$\text{b) } \delta = \delta^u = \pi - \sin^{-1} \frac{P}{P_e} = \pi - \delta^s$$

Sendo δ^s o ponto de equilíbrio estável e δ^u o ponto de equilíbrio instável. É conveniente transferir o ponto de equilíbrio estável de pós-falta para a origem, pela transformação $x = \delta - \delta^s$. Assim a equação (3.7) torna-se:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = P_e \text{sen} \delta^s - P_e \text{sen}(x + \delta^s) \quad (3.9)$$

Definindo $x_1 = x = \delta - \delta^s$ e $x_2 = \dot{x} = \dot{\delta} = \omega$, a equação (3.9) torna-se:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{M} [P_e \text{sen}(x_1 + \delta^s) - P_e \text{sen} \delta^s] \end{aligned} \quad (3.10)$$

Estas são as equações de estado do sistema e a origem $x_1 = x_2 = 0$ é um ponto de equilíbrio estável. Como $\frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0$, a equação (3.10) tem uma primeira integral $V(x_1, x_2) = C$.

De (3.10) obtém-se:

$$\frac{dx_1}{dx_2} = \frac{x_2}{(-1/M)[P_e \text{sen}(x_1 + \delta^s) - P_e \text{sen} \delta^s]} \quad (3.11)$$

A primeira integral é então obtida:

$$V(x_1, x_2) = \frac{x_2^2}{2} + \frac{1}{M} \int_0^{x_1} [P_e \text{sen}(x_1 + \delta^s) - P_e \text{sen} \delta^s] dx_1 \quad (3.12)$$

Calculando a integral obtém-se:

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2} M x_2^2 - P_e \cos(x_1 + \delta^s) + P_e \cos \delta^s - x_1 P_e \text{sen} \delta^s \quad (3.13)$$

Derivando a equação (3.13) obtém-se:

$$\dot{V}(x_1, x_2) = \frac{dV}{dx_1} \dot{x}_1 + \frac{dV}{dx_2} \dot{x}_2 \quad (3.14)$$

$$\dot{V}(x_1, x_2) = P_e \text{sen}(x_1 + \delta^s) x_2 - P_e \text{sen} \delta^s x_2 + x_2 [-P_e \text{sen}(x_1 + \delta^s) + P_e \text{sen} \delta^s] \quad (3.15)$$

Verifica-se que $\dot{V}(x_1, x_2) = 0$. Como $V > 0$, a origem é estável no sentido de Lyapunov.

Para relacionar V com as variáveis físicas, substitui-se na equação (3.9) $x_1 = \delta - \delta^s$ e $x_2 = \dot{\delta} = \omega$. Assim a equação (3.13) torna-se:

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2} M \omega^2 - P_e \cos \delta + P_e \cos \delta^s - (\delta - \delta^s) P_e \text{sen} \delta^s \quad (3.16)$$

Como $P = P_e \text{sen} \delta^s$ tem-se:

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2} M \omega^2 - P_e (\cos \delta - \cos \delta^s) - P (\delta - \delta^s) \quad (3.17)$$

Fisicamente $\frac{1}{2} M \omega^2 = V_K$ é a energia cinética do sistema, e a energia potencial é dada por $-[P_e (\cos \delta - \cos \delta^s) + P (\delta - \delta^s)] = V_P$. Como o sistema é conservativo, tem-se que:

$$V(\delta, \omega) = V_K(\omega) + V_P(\delta) = C \quad (3.18)$$

3.5 Métodos de Função Energia em Estudos de Estabilidade Transitória

A utilização de métodos TEF tem sido bastante pesquisada nas últimas três décadas [25,26,27,28,34,37]. Os principais métodos TEF se baseiam no cálculo do ponto de equilíbrio instável (u.e.p.) e são abordados a seguir, com o objetivo de facilitar a compreensão do tema.

3.5.1 Closest UEP

Os métodos que utilizam o u.e.p. se baseiam no fato de que uma trajetória instável cruza o limite de estabilidade do sistema num ponto muito perto de um u.e.p. Portanto, a energia crítica do sistema é aproximadamente igual à energia neste u.e.p., que é utilizada, então, para avaliar a margem de energia ao longo da trajetória do sistema. Um dos primeiros métodos de função energia, chamado *closest u.e.p.*, propõe o cálculo de todos os pontos de equilíbrio instáveis ao redor do ponto de equilíbrio estável (s.e.p.) em estudo [27,33,37]. A idéia é calcular as energias em todos os u.e.p. e a energia crítica é definida como sendo a menor energia dentre todos os u.e.p. O u.e.p. que possui a menor energia é conhecido como o *closest u.e.p.*, pois é o u.e.p. que está mais “próximo” energeticamente do s.e.p. em estudo. Uma vez determinada essa energia crítica encontra-se o tempo crítico de abertura, que é o tempo em que a energia do sistema atinge o valor da energia crítica. Essa metodologia fornece uma estimativa da área de atração, que pode ser conservadora, pois este método não leva em consideração a trajetória do sistema durante a falta. Dependendo do local da falta, a trajetória do sistema cruza o limite de estabilidade em diferentes pontos. Além disso, o cálculo de todos os u.e.p. de um sistema de potência requer um enorme esforço computacional. Essas razões inviabilizam a utilização desse método.

3.5.2 O UEP de controle

O método do u.e.p. de controle foi desenvolvido com o objetivo de estimar uma área de atração mais relevante, ou seja, aquela que leva em consideração a trajetória do sistema durante a falta [27,33,37]. Os procedimentos de análise de estabilidade através do método do u.e.p. de controle são os seguintes:

- a) Encontrar o u.e.p. de controle correspondente à trajetória do sistema durante a falta.
- b) Determinar a energia crítica V_{cr} como sendo o valor da função energia calculado no u.e.p. de controle. Utilizar a superfície de energia constante para estimar a parte relevante da fronteira da área de atração.
- c) Calcular o valor da função energia no instante da eliminação da falta V_{cl} .
- d) Se $V_{cl} < V_{cr}$, então o sistema pós-falta é estável, caso contrário é instável.

O procedimento (a) é a parte crucial deste método. Várias técnicas para determinar o u.e.p. de controle têm sido propostas e as mais importantes são o modo de instabilidade e o método BCU que será apresentado posteriormente.

3.5.3 O Método PEBS

O método PEBS foi desenvolvido para estimar a área de atração sem a necessidade do cálculo dos u.e.p. [27,33,38]. Para um sistema de uma máquina ligada a uma barra infinita, a idéia do método é a seguinte:

Seja o sistema de equações diferenciais que descrevem a dinâmica do sistema

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ M \dot{\omega} &= P - P_e \sin \delta \end{aligned} \quad (3.19)$$

Seja δ^s a posição de equilíbrio de interesse. A função $V(\delta, \omega) = \frac{1}{2}M\omega^2 - P(\delta - \delta^s) - P_e(\cos \delta - \cos \delta^s)$ é uma função energia desse sistema, que pode ser dividida em energia cinética e energia potencial, de modo que:

$$V_K = \frac{1}{2}M\omega^2 \quad (3.20)$$

$$V_P = -P(\delta - \delta^s) - P_e(\cos \delta - \cos \delta^s) \quad (3.21)$$

Nos pontos de equilíbrio do sistema a velocidade é nula e $V_P(\delta)$ é um ponto de extremo com relação à δ . Ao redor da posição de equilíbrio estável existe uma bacia energética, cuja fronteira é conhecida como PEBS. Esta fronteira é formada pelos pontos extremos de energia potencial que, neste caso, coincidem com as posições dos pontos de equilíbrio instáveis. O método PEBS aproveita essas idéias para encontrar o ponto de equilíbrio de controle. Este método consiste do seguinte algoritmo:

- a) Verifica-se o ponto no qual a trajetória do sistema em falta $x_f(t)$ cruza o PEBS, que é o ponto no qual a energia potencial atinge um máximo em cima da trajetória da falta. Seja δ^* este ponto.
- b) O valor da energia potencial em δ^* será a energia crítica $V_{cr} = V_P(\delta^*)$. Se no tempo de abertura t_{cl} , $V(t_{cl}) < V_{cr}$, então o sistema será estável.

O ponto de equilíbrio estável está localizado na parte mais baixa da bacia com a menor energia potencial, e os pontos de equilíbrio instáveis são os máximos locais da energia potencial ao longo da trajetória da falta. δ^* é denominado *exit point*, e o valor de sua energia é utilizado como a energia crítica para efeito de estimativa da região de estabilidade.

3.5.4 O Método BCU

O método BCU [27,39], também chamado de método do *exit point*, baseia-se no conceito de ponto de equilíbrio instável de controle para efetuar a estimativa da região de estabilidade. Este método não utiliza a idéia de estimativa pelo ponto de equilíbrio de menor energia com o objetivo de tentar eliminar as estimativas conservadoras. A sua eficiência está justamente na definição precisa, baseada em teoria matemática, do ponto de equilíbrio instável de controle. Para encontrar este ponto de equilíbrio de controle, o método BCU utiliza-se da relação existente entre a fronteira de estabilidade do sistema original e a fronteira de estabilidade do sistema reduzido $\delta = P - P_e$, segundo o algoritmo a seguir:

- a) Da trajetória do sistema em falta $x_f(t) = (\delta(t), \omega(t))$, detecta-se o *exit point* δ^* , que é o ponto em que a projeção da trajetória $\delta(t)$ cruza a fronteira de estabilidade do sistema reduzido (PEBS).
- b) Utiliza-se o ponto δ^* como condição inicial e resolvem-se numericamente as equações diferenciais do sistema reduzido para encontrar o mínimo local de $\sum_{i=1}^n \|f_i(\delta)\|$; seja este ponto δ_o^* .
- c) Utiliza-se o ponto δ_o^* como condição inicial para encontrar o zero da função $f(\delta)$, ou seja, encontrar o ponto de equilíbrio instável de controle do sistema reduzido δ_{co}^* .
- d) O ponto de equilíbrio instável de controle do sistema pós-falta será $(\delta_{co}^*, 0)$.

Para encontrar o ponto no qual a projeção da trajetória do sistema em falta cruza a fronteira de estabilidade do sistema reduzido pós-falta, verifica-se o momento em que a energia potencial atinge um máximo durante a trajetória. O método BCU tem se mostrado eficiente para várias situações de defeito, nos mais variados sistemas de

potência, mas todos os métodos que se utilizam do conceito de ponto de equilíbrio de controle garantem apenas a existência de estabilidade para a primeira oscilação.

3.6 Função Energia Aplicada em Análises de Colapso de Tensão

A utilização de função energia em análises estáticas de colapso de tensão implica, inicialmente, a definição de uma função escalar dependente das variáveis de estado do sistema – magnitude da tensão e ângulo de fase das barras – que tem a propriedade da solução operativa definir um ponto de mínimo dessa energia [29,30,31,32,40]. Fazendo-se uma analogia com o “poço de energia” mencionado anteriormente no item 3.3, pode-se imaginar o ponto de operação estável ocupando o fundo desse poço. No entanto, o sistema está sendo constantemente perturbado por pequenas variações de carga que afastam o ponto de operação do equilíbrio e que introduzem uma pequena quantidade de energia cinética no sistema. Essa energia é naturalmente dissipada pelo amortecimento do sistema, de modo que, num ponto de operação seguro, onde a “energia do poço” é profunda, seus efeitos não desprezados. Porém, à medida que o carregamento do sistema se eleva, aproximando-o do ponto de colapso, a profundidade dessa energia se reduz. Neste caso, uma pequena perturbação pode empurrar o ponto de operação para fora do poço, configurando-se um colapso de tensão. Uma condição necessária para que isso aconteça é que o sistema receba uma energia maior do que o valor da energia potencial do u.e.p. mais próximo, situado no limite do poço. Nos estudos de estabilidade de tensão, baseados em função energia, esses u.e.p., ou pontos de sela-nó, correspondem às soluções alternativas do fluxo de carga [29,30,31,32,41] que apresentam magnitudes reduzidas de tensão em algumas barras de carga do sistema. Neste trabalho, essas soluções serão chamadas de “soluções instáveis” do fluxo de carga, enquanto que as soluções operativas serão denominadas “soluções estáveis”. Conceitualmente, a aplicação da função energia em análises de estabilidade de tensão baseia-se na medida de diferença de energia entre a solução estável e a solução instável. Nesta aplicação, somente a energia potencial do sistema é necessária, dispensando a inclusão de amortecimentos e de modelos complexos de geradores. De acordo com resultados apresentados em [29,30,31,32], essa diferença de energia é um bom indicativo da

distância do sistema para o colapso de tensão. À medida que aumenta o carregamento do sistema, a distância entre as soluções estável e instável se reduz e a energia do sistema decresce, conforme mostrado na Figura 3.5. No ponto de colapso, as soluções estáveis e instáveis tornam-se uma só e a energia do sistema tende a zero. Este comportamento da energia possibilita, de qualquer ponto de operação, uma boa estimativa da distância até o ponto de colapso e, conseqüentemente, a obtenção de informações a respeito da margem de carga do sistema.

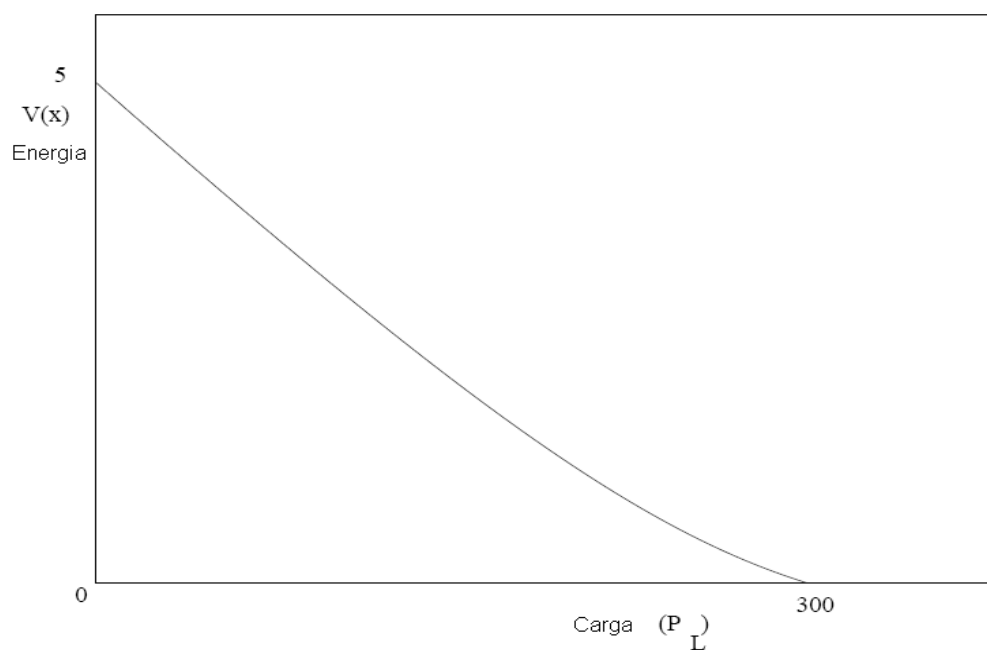


Figura 3.5 – Função energia versus potência ativa da carga

Para um modelo de sistema de potência, desprezando-se as condutâncias de transferência, a função energia é definida da seguinte maneira [29,30,31,32]:

$$\mathcal{V}(x^s, x^u) = \int_{(x^s, v^s)}^{(x^u, v^u)} [f^T(\xi, v), g^T(\xi, v)]^T [d\xi, dv]^T \quad (3.22)$$

Onde:

x^s = solução estável (α^s, v^s)

x^u = solução instável (α^u, v^u).

v e α são as magnitudes de tensão e os ângulos das barras do sistema, respectivamente, e

$$f_i(\alpha, v) = P_i - \sum_{j=1}^n B_{ij} |V_i| |V_j| \text{sen}(\alpha_i - \alpha_j) \quad (3.23)$$

$$g_i(\alpha, v) = (V_i)^{-1} \left[Q_i + \sum_{j=1}^n B_{ij} |V_i| |V_j| \cos(\alpha_i - \alpha_j) \right] \quad (3.24)$$

Observa-se que as expressões (3.23) e (3.24) são as equações de “mismatches” de potência ativa e reativa do fluxo de carga, sendo a última multiplicada por V^{-1} . A derivada parcial da função energia com respeito ao primeiro ou segundo argumento é igual a zero num ponto de equilíbrio, pois os “mismatches” têm que ser nulos neste ponto. Para um sistema sem perdas, a função energia ϑ é uma função de Lyapunov e, portanto, a solução estável define um ponto de mínimo local dessa função e sua primeira derivada é igual a zero. Por outro lado, se o sistema tiver perdas isso não é mais verdade. Esta dificuldade pode ser contornada, redefinindo-se f e g da equação (3.22) como segue:

$$\begin{aligned} f_i(\alpha, v) &= P_i - \sum_{j=1}^n B_{ij} |V_i| |V_j| \text{sen}(\alpha_i - \alpha_j) \\ &- \sum_{j=1}^n G_{ij} |V_i^s| |V_j^s| \cos(\alpha_i^s - \alpha_j^s) \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}
g_i(\alpha, v) = & (V_i)^{-1} \left[Q_i + \sum_{j=1}^n B_{ij} |V_i| |V_j| \cos(\alpha_i - \alpha_j) \right] \\
& - (V_i^s)^{-1} \sum_{j=1}^n G_{ij} |V_i^s| |V_j^s| \text{sen}(\alpha_i^s - \alpha_j^s)
\end{aligned} \tag{3.26}$$

Os termos constantes, localizados nas segundas linhas das equações (3.25) e (3.26), foram adicionados às equações (3.23) e (3.24) de modo que f e g tornam-se iguais a zero na solução estável, mesmo que o sistema possua condutâncias de transferência. Calculando-se a integral em (3.22), obtém-se a função energia:

$$\begin{aligned}
\vartheta(x^s, x^u) = & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} |V_i^u| |V_j^u| \cos(\alpha_i^u - \alpha_j^u) \\
& + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} |V_i^s| |V_j^s| \cos(\alpha_i^s - \alpha_j^s) \\
& + \sum_{i=1}^n \int_{V_i^s}^{V_i^u} \frac{Q_i(x)}{x} dx - P^T (\alpha^u - \alpha^s) \\
& - \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n G_{ij} |V_i^s| |V_j^s| \cos(\alpha_i^s - \alpha_j^s) (\alpha_i^u - \alpha_i^s) \right] \\
& + \sum_{i=1}^n \left[(V_i^s)^{-1} \sum_{j=1}^n G_{ij} |V_i^s| |V_j^s| \text{sen}(\alpha_i^s - \alpha_j^s) (V_i^u - V_i^s) \right]
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Considerando que a parte reativa da carga é constante, o termo da integral na equação (3.27) torna-se:

$$Q_i \ln \left(\frac{V_i^u}{V_i^s} \right) \tag{3.28}$$

3.7 Função Energia em Coordenadas Retangulares

As equações do fluxo de carga podem ser formuladas tanto em coordenadas polares como em coordenadas retangulares, dependendo de como a tensão em cada barra é explicitada. Esta seção desenvolve, a princípio, as equações do fluxo de carga em coordenadas retangulares, para, em seguida, apresentar a função energia – utilizada em estudos de estabilidade de tensão – na formulação retangular. De acordo com [42], cada formulação das equações do fluxo de carga possui uma região de convergência diferente. Ainda de acordo com [42], a formulação em coordenadas polares tem dificuldades de convergir para a solução instável, enquanto que a formulação em coordenadas retangulares apresenta características interessantes, convergindo de “forma direta” para a solução instável. No entanto, testes executados com a técnica proposta neste trabalho mostram que a obtenção da solução instável com o uso da formulação polar não apresenta problemas.

Na formulação em coordenadas retangulares das equações do fluxo de carga, a tensão é explicitada da seguinte forma [43]:

$$V_i = e_i + jf_i \quad (3.29)$$

Na equação acima, e e f são, respectivamente, os componentes real e imaginário da tensão. Na equação abaixo, P e Q são, respectivamente, a potência ativa e a potência reativa da potência aparente S , dada por:

$$S = P + jQ \quad (3.30)$$

As equações de “mismatches” de potência do fluxo de carga são dadas por:

Barras PV e PQ:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i^{calc}(e, f) = P_i^{esp} - \sum_{j=1}^n [e_i(G_{ij}e_j - f_jB_{ij}) + f_i(f_jG_{ij} + e_jB_{ij})] \quad (3.31)$$

Barras PQ:

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i^{calc}(e, f) = Q_i^{esp} - \sum_{j=1}^n [f_i(G_{ij}e_j - f_jB_{ij}) + e_i(f_jG_{ij} + e_jB_{ij})] \quad (3.32)$$

Lembrando que:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.33)$$

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (3.34)$$

$$S_i = V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* = (e_i + jf_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij} - jB_{ij})(e_j - f_j) \quad (3.35)$$

Equação de “mismatch” de tensão (apenas para as barras PV):

$$\Delta |V_i|^2 = (|V_i|^{esp})^2 - (|V_i|^{calc})^2 \quad (3.36)$$

Onde:

$$(|V_i|^{calc})^2 = e_i^2 + f_i^2 \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} e &= V \cos \delta \\ f &= V \sin \delta \end{aligned} \quad (3.38)$$

Tem-se então a matriz Jacobiana:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta|V|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial \Delta P}{\partial e} & -\frac{\partial \Delta P}{\partial f} \\ -\frac{\partial \Delta Q}{\partial e} & -\frac{\partial \Delta Q}{\partial f} \\ -\frac{\partial \Delta|V|^2}{\partial e} & -\frac{\partial \Delta|V|^2}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

A função energia em coordenadas retangulares é formulada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \vartheta(x^s, x^u) = & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} |e_i^u| |e_j^u| - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} |f_i^u| |f_j^u| + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} |e_i^s| |e_j^s| \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} |f_i^s| |f_j^s| + P_i^T \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{f_i^u}{e_i^u} \right) - P_i^T \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{f_i^s}{e_i^s} \right) + Q_i \log \frac{\sqrt{e_i^{u2} + f_i^{u2}}}{\sqrt{e_i^{s2} + f_i^{s2}}} \\ & + \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n -G_{ij} |e_i^s| |e_j^s| \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{f_i^u}{e_i^u} \right) + G_{ij} |e_i^s| |e_j^s| \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{f_i^s}{e_i^s} \right) - G_{ij} |f_i^s| |f_j^s| \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{f_i^u}{e_i^u} \right) + G_{ij} |f_i^s| |f_j^s| \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{f_i^s}{e_i^s} \right) \right] \\ & + \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n -G_{ij} |f_i^s| |e_j^s| \operatorname{sen} \frac{\sqrt{e_i^{u2} + f_i^{u2}}}{\sqrt{e_i^{s2} + f_i^{s2}}} + G_{ij} |f_i^s| |e_j^s| + G_{ij} |e_i^s| |f_j^s| \operatorname{sen} \frac{\sqrt{e_i^{u2} + f_i^{u2}}}{\sqrt{e_i^{s2} + f_i^{s2}}} - G_{ij} |e_i^s| |f_j^s| \right] \end{aligned} \quad (3.40)$$

De acordo com o que foi apresentado na formulação da função energia, tanto em coordenadas polares quanto em coordenadas retangulares, o cálculo da diferença de energia entre as soluções estáveis e instáveis depende, obviamente, da solução instável, também conhecida como “solução de baixa tensão” (do inglês *low voltage solution*). Para sistemas de potência de grande porte, a determinação da solução instável torna-se um problema complexo e será abordado, separadamente, no próximo capítulo.

Capítulo 4

DETERMINAÇÃO DAS SOLUÇÕES INSTÁVEIS DAS EQUAÇÕES DO FLUXO DE CARGA

4.1 Introdução

A importância da determinação das soluções instáveis das equações do fluxo de carga deve-se ao fato de que alguns métodos, que calculam a proximidade do ponto de colapso de tensão de um sistema elétrico de potência, utilizam a distância entre uma solução instável e a solução estável do fluxo de carga para tal fim [29,41,44,45]. O método de função energia para a análise de estabilidade de tensão, proposto neste trabalho, é também um exemplo da relevância da obtenção das múltiplas soluções das equações do fluxo de carga. Para que estes métodos sejam eficientes, faz-se necessário que o cálculo das soluções instáveis seja realizado de maneira bastante confiável.

Este capítulo tratará inicialmente da existência e caracterização das soluções instáveis do fluxo de carga. Em seguida serão abordadas algumas técnicas utilizadas para o cálculo destas soluções e finalmente será apresentada a proposta para a determinação das soluções instáveis do fluxo de carga, que é um dos objetivos deste trabalho.

4.2 Múltiplas Soluções das Equações do Fluxo de Carga

Sabe-se que as equações do fluxo de carga podem ter múltiplas soluções. Dependendo do carregamento do sistema de potência, o número de soluções pode ser muito elevado. Estima-se em 2^{n-1} o número máximo de soluções em um sistema de potência, pouco carregado, com n barras [41,42,46,47,48,49,50]. Estas diferentes soluções podem ser classificadas de acordo com os autovalores da matriz Jacobiana do fluxo de carga. Para a solução estável, que corresponde ao ponto operativo do sistema de potência, todos os autovalores possuem parte real negativa. Uma solução instável tem a propriedade de a matriz Jacobiana, do sistema linearizado em torno deste ponto de equilíbrio instável, possuir um único autovalor com parte real positiva, correspondente a esta solução, que se denomina solução instável “tipo um” (do inglês *type-one solution*). Existe também a solução instável “tipo dois”, que se caracteriza por a matriz Jacobiana possuir dois autovalores com parte real positiva. As soluções instáveis do fluxo de carga apresentam níveis reduzidos de tensão em algumas barras de carga do sistema [31,48].

As 2^{n-1} soluções do fluxo de carga mencionadas acima formam um conjunto de todas as possíveis combinações de soluções de um sistema de potência. À medida que o sistema se aproxima do ponto de colapso, o número de soluções instáveis tende a diminuir, até que em algum ponto próximo ao colapso existe apenas a solução estável e uma solução instável. No ponto de bifurcação estas duas soluções se juntam, tornando-se apenas uma única solução. Resultados de análises em [46,48] demonstram que o sistema sempre perde o equilíbrio através de uma bifurcação do tipo sela-nó, entre a solução estável e uma solução instável “tipo um”. Todas as outras soluções instáveis desaparecem devido a ocorrências de bifurcações intermediárias que acontecem antes da bifurcação sela-nó final [19,44,45,48,49,50]. Portanto, o conjunto de soluções instáveis a ser encontrado pode se restringir àquelas soluções “tipo um”.

Para ilustrar essa questão do número de soluções das equações do fluxo de carga é mostrado a seguir um exemplo de um sistema de três barras [31]. O sistema consiste de uma barra de referência (Barra nº 3) e de duas barras de carga (Barras nº 1 e 2) conectadas através de linhas de transmissão, como mostrado na Figura 4.1. Existem, para esse sistema, quatro soluções do fluxo de carga, uma vez que 2^{n-1} soluções podem ser identificadas. A Tabela 4.1 mostra estas quatro soluções, as energias calculadas, os autovalores e autovetores da matriz Jacobiana do fluxo de carga.

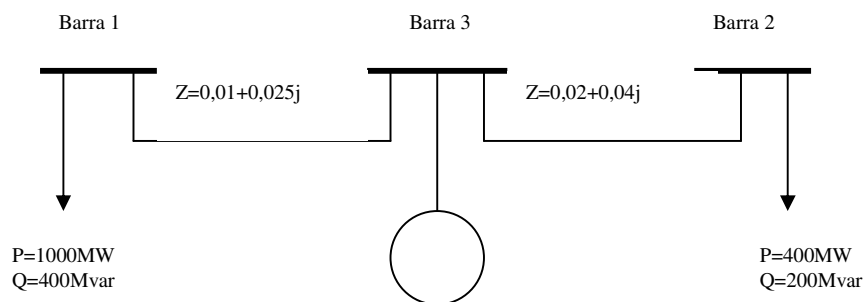


Figura 4.1 – Sistema de 3 barras

Tabela 4.1 – Soluções do sistema de 2 barras

	Número da Solução			
	(x^0)	(x^1)	(x^2)	(x^3)
Tensão barra 1	0,614	0,472	0,614	0,472
Ângulo barra 1	-20,0°	-26,4°	-20,0°	-26,4°
Tensão barra 2	0,784	0,784	0,255	0,255
Ângulo barra 2	-8,8°	-8,8°	-28,1°	-28,1°
Energia		0,127	1,636	1,763
Autovalores	-4,86	4,22	8,09	4,22
	-26,79	-23,74	-8,65	8,09
	-13,7+j5,2	-13,7+j5,2	-4,86	-8,65
	-13,7-j5,2	-13,7-j5,2	-26,79	-23,74
Autovetores dos autovalores positivos		0,678	0,000	
		0,737	0,000	
		0,000	0,846	
		0,000	0,735	

A solução zero (x^0) corresponde à solução estável, enquanto que as soluções um (x^1) e dois (x^2) são as soluções instáveis “tipo um”. A solução três (x^3) é a solução instável “tipo dois”. Os autovetores associados aos autovalores positivos das soluções instáveis indicam as áreas afetadas pelo colapso. A presença de elementos diferentes de zero nas duas primeiras linhas do autovetor v^1 (associado à solução x^1) e de elementos zero nas duas últimas linhas indica que, se houver um colapso através da bifurcação de x^0 e x^1 , a barra mais sensível à instabilidade é a Barra 1. Assim a energia $\mathcal{V}(x^1)$ fornece uma medida de vulnerabilidade ao colapso de tensão na área em torno da barra 1. Raciocínio análogo se faz com a solução x^2 . Como x^3 é uma solução instável “tipo dois”, não se utiliza a energia $\mathcal{V}(x^3)$ associada a ela. O menor valor de energia calculado, $\mathcal{V}(x^1)$, também indica que a Barra 1 é mais vulnerável ao colapso do que a Barra 2.

Uma solução instável “tipo um” pode ser identificada pelo número da barra com a menor magnitude de tensão e proporciona uma medida de segurança para o colapso de tensão, ocorrendo inicialmente nas barras associadas aos maiores componentes do autovetor correspondente ao autovalor positivo. Como as soluções instáveis são utilizadas em métodos que estimam a margem de estabilidade de tensão, é de fundamental importância o cálculo das soluções instáveis e, principalmente, a correta determinação da solução instável “tipo um”, que se bifurca com a solução estável no ponto de colapso de tensão. Esta solução é denominada solução instável crítica. Caso a solução instável utilizada não seja a crítica, a margem de estabilidade de tensão não será calculada corretamente, tendo em vista que todas as demais soluções instáveis desaparecem antes do ponto de bifurcação sela-nó.

4.3 Métodos para a Determinação das Soluções Instáveis das Equações do Fluxo de Carga

Alguns métodos para a determinação dessas soluções instáveis têm sido propostos na literatura [48,49,50,51]. Conforme já mencionado acima, a procura pelas soluções instáveis pode se restringir àquelas correspondentes aos pontos de equilíbrio que tenham um único autovalor positivo [31]. Além disso, apenas as soluções associadas a valores de energia reduzidos precisam ser determinadas. Existem basicamente duas famílias de métodos, propostos na literatura, para a determinação das soluções instáveis do fluxo de carga, a saber: os conhecidos como PFM [22,52] e os denominados SSSM [42,48,51].

Os PFM são muito robustos, porém computacionalmente lentos. Sua principal característica é – partindo de uma direção de crescimento de carga pré-determinada – a capacidade de superar os problemas normalmente encontrados nos métodos de fluxo de carga convencionais, como o mau condicionamento e a singularidade da matriz Jacobiana na região de máximo carregamento, podendo assim calcular a parte inferior dessas curvas. O problema dos PFM é a dependência com relação à direção de crescimento de carga escolhida. Se esta direção de crescimento de carga se alterar, a solução instável crítica pode mudar. Neste caso, faz-se necessário calcular a nova solução crítica, considerando a nova direção de crescimento.

Os SSSM se baseiam na idéia de que uma solução instável pode ser encontrada através de um fluxo de carga convencional, desde que se tenha uma boa estimativa inicial. Assumindo-se que a solução estável é conhecida, as seguintes etapas são realizadas: (a) encontrar uma direção do espaço de estados a partir da solução estável; (b) determinar uma estimativa de estado inicial para a solução instável, ao longo da direção do espaço de estados; (c) obter a solução instável através do fluxo de carga convencional. É importante ressaltar que esses métodos não são capazes de alcançar o ponto de máximo carregamento do sistema, tendo em vista que eles se baseiam nos cálculos das equações de um fluxo de carga convencional, sem lidar, portanto, com a singularidade da matriz Jacobiana. Ao contrário dos PFM, os SSSM calculam as soluções instáveis independentemente da direção de crescimento de carga, não fornecendo nenhum indicativo de como encontrar a solução instável crítica. Caso a solução instável calculada não for a crítica, esta irá bifurcar e desaparecer antes do ponto de colapso de tensão, e a única alternativa é utilizar novamente o método. Observa-se que a escolha aleatória de uma solução instável pode levar o método a uma seqüência de tentativas e erros em que o SSSM não deve convergir, principalmente se o sistema de potência estiver próximo do ponto de colapso, quando a maioria das soluções instáveis simplesmente já bifurcou e desapareceu. As referências [42,47] apresentam um método eficiente que encontra o par de soluções estável e instável quando o sistema se aproxima do colapso e que explora as características de convergência do fluxo de carga utilizando o método de Newton-Raphson expresso em coordenadas retangulares. Já o método proposto em [48] encontra as soluções instáveis mesmo nos casos onde estas soluções estejam longe da solução estável.

Outros métodos, baseados nos SSSM, foram propostos com a finalidade de superar as desvantagens mencionadas acima. Como exemplo, pode-se citar o método que utiliza um sistema dinâmico auxiliar para o cálculo das soluções instáveis [49,50]. Este método permite o cálculo de uma nova solução instável crítica, toda vez que a solução anterior bifurcar e desaparecer. Outro exemplo é o método proposto por [51] que possui as seguintes características: (a) um procedimento é proposto de modo a se obter a direção

do espaço de estado e uma estimativa de estado inicial para o cálculo das soluções instáveis; (b) os casos divergentes são detectados e manipulados através do uso de técnicas de otimização do tamanho do passo; (c) o método identifica a solução instável desejada, nos casos em que existam várias soluções próximas; (d) a solução instável pode ser encontrada, não importando a distância para a solução estável.

4.4 Método Proposto para a Identificação da Solução Instável Crítica

Esta seção apresenta o método proposto e desenvolvido neste trabalho para a identificação da solução instável crítica das equações do fluxo de carga. A idéia é utilizar uma abordagem de tentativa e erro para a estimativa inicial na determinação dessas soluções instáveis, através de um fluxo de carga convencional.

Para se determinar a solução estável das equações de um fluxo de carga convencional, que utiliza o método de Newton-Raphson, inicia-se o processo iterativo com uma estimativa inicial próxima a essa solução, tendo em vista que se sabe que os sistemas elétricos de potência operam com níveis de tensão em torno de 1,0 pu. No entanto, saber qual ponto está próximo da solução instável não é uma tarefa trivial, de forma que a questão fundamental é encontrar uma boa estimativa inicial para que o método convirja para a solução instável. Esta questão é solucionada identificando-se antecipadamente a barra crítica do sistema através do método do vetor tangente, apresentado no Capítulo 2. Após a identificação da barra crítica, inicia-se uma iteração de Newton-Raphson com uma estimativa de tensão de valor reduzido nessa barra, considerando que a área onde está localizada a barra crítica converge para a solução instável crítica, com um valor reduzido de tensão e com o menor valor de energia. A escolha da estimativa inicial pode variar de acordo com o sistema elétrico que estiver sendo simulado, devendo-se realizar testes de convergência no sistema, com o objetivo de encontrar a estimativa adequada.

Outro problema a ser resolvido é o fato de que o método de Newton-Raphson – quando se tenta fazer com que ele convirja para a solução instável do sistema partindo de um ponto próximo – tende a convergir para uma solução distante do ponto inicial, correspondente a alguma solução múltipla das soluções estáveis. Isto ocorre porque, próximo à solução instável, a matriz Jacobiana é mal condicionada e as correções nas variáveis de estado se tornam muito elevadas, enviando-as para longe do ponto inicial. Este problema é solucionado através do controle do passo do processo iterativo, o que faz com que o método convirja para a solução instável, mesmo com o mau condicionamento da matriz Jacobiana.

O controle do passo é feito após a correção nas variáveis de estado ter sido determinada; se o vetor de correção tem norma maior do que 1, esse vetor é normalizado. Assim, evita-se que o método convirja para uma solução longe da estimativa inicial. Isso significa que, se tivermos uma maneira de prever o local da solução instável, mesmo com um erro elevado, é possível se obter a convergência para a solução instável.

Após serem discutidos os conceitos de função energia e sua aplicação na análise do colapso de tensão e a questão do cálculo da solução instável, proposto nesta seção, o próximo capítulo tratará da implementação da proposta desta tese, utilizando a matriz Jacobiana estendida.

Capítulo 5

MATRIZ JACOBIANA ESTENDIDA DO FLUXO DE CARGA: APLICAÇÕES

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados alguns métodos de análise estática que utilizam o auxílio de uma matriz Jacobiana estendida [53,54,55,56], com o objetivo de se fazer um histórico dessas aplicações, exemplificando suas utilidades. A idéia é incorporar à matriz, as equações pertinentes ao problema que está sendo estudado. Os problemas analisados são: remoção de sobrecarga, bloqueio de LTC, estratégia de alívio de carga e redespacho para redução de perdas. Além desses, será apresentada a nossa proposta, que é a incorporação na matriz Jacobiana das equações da função energia e das equações do fluxo de carga para obter as atualizações das soluções instáveis a cada iteração. Esse último tópico é o objetivo principal deste trabalho e consiste na determinação de uma margem de carga de um sistema de potência até o ponto de colapso, utilizando a técnica da função energia com o auxílio da matriz Jacobiana estendida.

5.2 Algumas Aplicações Utilizando a Matriz Jacobiana Estendida

Remoção da Sobrecarga e o Método da Continuação [53,56]

O método da continuação, que foi abordado superficialmente no Capítulo 2, consiste em traçar o caminho de um sistema de potência de um ponto de equilíbrio estável até um ponto de bifurcação, a partir de sucessivos incrementos de carga, obtendo-se então informações quanto à margem de carga deste sistema. Esta metodologia utiliza o seguinte modelo de sistema:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (5.1)$$

Onde x representa as variáveis de estado e λ é um parâmetro do sistema, utilizado para levá-lo de um ponto de equilíbrio para outro. Em estudos de colapso de tensão, geralmente, λ é o fator de incremento da carga / geração. Dois passos movem o sistema ao longo do caminho da bifurcação:

- a) Previsor: utilizado para indicar uma direção de crescimento da carga. O vetor tangente, que é usado para esse propósito, é dado por:

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Onde J é a matriz Jacobiana do fluxo de carga, θ e V são as variáveis de estado (ângulo de fase e magnitude de tensão, respectivamente), P_0 e Q_0 são as potências ativa e reativa líquidas conectadas em cada barra. VT é o vetor tangente. O passo previsor é dado por:

$$\Delta\lambda = \frac{1}{\|VT\|} \quad (5.3)$$

Onde $\|VT\|$ é a norma Euclidiana do vetor tangente. Pode-se observar, a partir dessa expressão, que, quanto mais inclinada for a curva, menor será o passo previsor e vice versa. O método dá grandes passos quando o sistema está afastado do ponto de bifurcação e passos menores à medida que o sistema se aproxima da bifurcação. O ponto de operação real é obtido com o auxílio do passo corretor.

- b) Corretor: esse passo é obtido através da inclusão de uma equação extra. Tal equação advém do fato de que os vetores previsor e corretor são perpendiculares entre si. Se o passo previsor for utilizado como estimativa inicial do programa de fluxo de carga, o passo corretor normalmente converge rapidamente.

A estrutura da matriz Jacobiana associada a esse método é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rhs1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 \\ M & L & \\ FF1 & & kF1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Onde H , N , M e L são as sub-matrizes do Jacobiano do fluxo de carga e o vetor $k1$ representa as direções predeterminadas de crescimento de geração e carga. $FF1$ e $kF1$ correspondem à parametrização da equação no fluxo de carga continuado. Durante a região “normal” da continuação, $kF1$ é igual a 1 e $FF1$ é uma linha com todos os elementos iguais a zero. Quando o sistema se aproxima da bifurcação, a matriz Jacobiana se torna mal condicionada e uma parametrização diferente é utilizada, de acordo com a estrutura abaixo:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rhs1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 \\ M & L & \\ & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Na equação (5.5), “1” é um vetor linha associado à nova variável parâmetro. Este vetor é todo zero, exceto na posição correspondente ao parâmetro desejado. Então λ se torna uma variável de estado, enquanto que uma variável de estado, por exemplo, um nível de tensão $|V|$ passa a ser o parâmetro do sistema. Durante o processo da continuação, pode haver a identificação de um ou mais limites de fluxo. Para se resolver esse problema, fazem-se necessárias algumas considerações adicionais. A estrutura desse problema e seus resultados são apresentados a seguir.

A idéia é resolver os problemas do método da continuação considerando os limites de carregamento das linhas de transmissão. Isso pode ser feito incorporando ao sistema Jacobiano uma nova linha $FF2$ e uma nova coluna $k2$, conforme mostrado abaixo:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rhs1 \\ rhs2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 & \\ M & L & & k2 \\ FF1 & & kF1 & \\ & FF2 & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ TS \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

O vetor linha $FF2$ contém as derivadas parciais da equação de potência ativa, associada à linha de transmissão em sobrecarga, com respeito às variáveis de estado do sistema [53,56]. Essa linha não possui mais que quatro elementos não nulos. Tão logo a sobrecarga é identificada, o carregamento da linha de transmissão é mantido em seu limite máximo através da inclusão dessa equação. Essa nova equação se torna permanente no conjunto de equações do sistema, resultando na nova linha $FF2$ no Jacobiano.

Com o objetivo de se regular esse fluxo, aplica-se o redespacho. O redespacho é modelado através da inclusão de uma nova coluna $k2$, associada aos geradores escolhidos para remoção da sobrecarga. Os valores definidos para esses geradores são: 1 (gerador escolhido para acréscimo de geração) e -1 (gerador escolhido para redução de geração). Os demais elementos desse vetor são nulos. À medida que um gerador é escolhido para aumentar sua geração em um valor (não especificado) TS , outro gerador é escolhido para reduzir sua geração nesse mesmo valor TS .

Esse novo conjunto aumentado de equações é resolvido pelo método de Newton-Raphson. Suas saídas são as variáveis de estado tradicionais (ângulos de fase nas barras PV e PQ e níveis de tensão nas barras PQ) e o desvio de potência ativa nas máquinas escolhidas para remover a sobrecarga TS . Observa-se, da equação (5.6), que a sobrecarga não é uma função explícita do redespacho. A cada iteração, calcula-se o carregamento na linha de transmissão cujo limite foi violado. O processo converge para um valor de redespacho correspondente ao carregamento limite da linha de transmissão. Assim, se uma sobrecarga é identificada, o

carregamento da linha é mantido constante durante os subseqüentes acréscimos de carga do processo da continuação. Se uma segunda sobrecarga é identificada, outro par de redespacho é escolhido e a estrutura do Jacobiano evolui da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rhs1 \\ rhs2 \\ rhs3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 & & \\ M & L & & k2 & k3 \\ FF1 & & kF1 & & \\ & FF2 & & 0 & \\ & FF3 & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ TS1 \\ TS2 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Na estrutura acima, $FF3$, $rhs3$ e $k3$ têm o mesmo significado de $FF2$, $rhs2$ e $k2$. Observa-se que o método proporciona diferentes valores de redespachos $TS1$ e $TS2$, possibilitando o tratamento de diferentes restrições simultaneamente.

Uma questão importante na remoção da sobrecarga consiste na escolha dos geradores que serão redespachados. Estes geradores são identificados através de uma técnica de sensibilidade, baseada em informações fornecidas pelo vetor tangente [56], considerando a geração de cada gerador analisado como parâmetro. Para este propósito, as perdas de potência ativa são calculadas apenas na área crítica e verifica-se a variação destas perdas em função de um aumento de geração em um gerador qualquer. Avaliando-se todos os geradores do sistema, o cálculo do vetor tangente indica os geradores cujos redespachos mais reduzem as perdas do sistema.

Determinação do Instante de Bloqueio de LTC [54,57,58,59]

No método da continuação apresentado no item anterior, onde a margem de carga do sistema de potência é a questão de interesse, λ é o fator de acréscimo da carga / geração. Isso significa que o sistema pode se tornar instável devido aos sucessivos aumentos da carga. Nessas condições, pode-se encontrar um ponto de equilíbrio estável com um nível de tensão reduzido e seria recomendado se elevar esta tensão. Nesse caso, o parâmetro que leva o sistema para um novo ponto de operação é a mudança de tape. As derivadas parciais da equação (5.1), com relação ao parâmetro λ , em um ponto de equilíbrio j , são dadas por:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_j \frac{dx}{d\lambda} \bigg|_j + \frac{\partial f}{\partial \lambda} \bigg|_j = 0 \quad (5.8)$$

Da equação acima, obtém-se o vetor tangente:

$$\frac{dx}{d\lambda} \bigg|_j = - \left(\frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_j \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial \lambda} \bigg|_j \quad (5.9)$$

Onde $\frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_j$ é a matriz Jacobiana no ponto de operação j e $\frac{\partial f}{\partial \lambda} \bigg|_j$ é a derivada parcial em relação ao parâmetro tape. Todos os componentes desse vetor são nulos, exceto as entradas associadas às barras conectadas aos LTC.

À medida que o LTC tende a recuperar o nível de tensão, um melhor perfil de tensão é obtido e um novo ponto de equilíbrio estável é alcançado. No entanto, é possível que, a partir de um determinado ponto de operação, essa ação do LTC possa levar o sistema ao colapso. A equação (5.9) mostra como as variáveis de estado mudam em função do parâmetro do sistema, portanto ela será usada como um índice. O objetivo da ação do LTC é aumentar o nível de tensão numa barra de interesse. Em condições normais de operação, existe uma correspondência entre a mudança de tape e a variação de tensão na barra controlada. Essa relação é estabelecida pela entrada $\frac{dV_{int}}{d\lambda}$ do vetor, onde *int* se refere à barra controlada. Desde que $\frac{dV_{int}}{d\lambda}$ tenha o mesmo sinal coerente, o nível de tensão na barra *int* está sendo controlada corretamente. Quando o sinal inverte, a ação do LTC proporciona um efeito contrário. Este fato é suficiente para que esse índice seja escolhido para monitorar o instante de bloqueio do LTC. Apesar de o índice adotado considerar a mudança de tape como uma variável contínua, na prática ela é um controle discreto. Por conta disso, o LTC é bloqueado no tape mais perto daquele calculado pelo método.

Estratégia de Alívio de Carga [55]

O alívio de carga ocorre quando um sistema de potência está operando numa condição não satisfatória e não se dispõe de nenhuma ação de controle. Geralmente, o alívio de carga é analisado em sistemas de potência como uma medida corretiva para resolver problemas de sub-freqüência ou de subtensão. O método que será apresentado a seguir utiliza a magnitude da tensão da barra de interesse como um indicador. A idéia é similar ao controle remoto de tensão. Neste tipo de controle um gerador controla o nível de tensão numa barra remota. A tensão da barra é conhecida enquanto que a tensão no gerador é uma variável de estado. A implementação do método consiste na substituição de uma coluna, desde que as derivadas parciais calculadas em relação à tensão no gerador devem ser incorporadas no conjunto de equações. Por outro lado, as derivadas parciais em relação à tensão monitorada são removidas, pois esta tensão é conhecida. O objetivo do método é determinar o alívio de carga no sentido de manter o nível da tensão em um valor pré-especificado. Portanto, o alívio de carga passa a ser considerado uma variável de estado, obtendo-se assim o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_k \\ \Delta Q \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & \tilde{N} \\ M & \tilde{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta C \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Na equação (5.10), H , \tilde{N} , M e \tilde{L} são as derivadas parciais das equações de potência ativa e reativa (ΔP e ΔQ) em relação aos ângulos de fase ($\Delta \theta$) e magnitudes de tensão (ΔV). \tilde{N} e \tilde{L} diferem da matriz Jacobiana original porque não contêm as derivadas parciais em relação à tensão na barra controlada. A última coluna advém das equações $P_k = P_{k0}(V, \theta) - \Delta C$ e $Q_k = Q_{k0}(V, \theta) - \Delta C$, onde k é a barra provável a sofrer o alívio de carga (ΔC).

Observa-se que a convergência é obtida normalmente de acordo com o processo do método de Newton-Raphson. Não se espera nenhum problema numérico, pois o conjunto de equações não é singular. O método pode também lidar com outras combinações de controle de tensão / alívio de carga.

Redespacho para Redução de Perdas

O método que será abordado neste item pretende elevar a margem de carga de um sistema através da redução de suas perdas. A referência [56] explora a questão de que o colapso de tensão pode estar associado a perdas elevadas no sistema e que, reduzindo-se essas perdas na área crítica, pode-se elevar a margem de carga. A idéia do método é aumentar a matriz Jacobiana do sistema, incorporando a equação de perda de potência ativa. Assim, uma linha adicional relativa à perda de potência ativa na área crítica é incluída na matriz Jacobiana. A área crítica é identificada pelo vetor tangente. A redução das perdas é obtida através do redespacho de geradores. Se isso não for suficiente, emprega-se a compensação local de potência reativa. A inclusão da nova linha torna necessária uma nova coluna, que é associada ao redespacho de geradores ou à compensação de potência reativa, dependendo da aplicação. Portanto, tem-se o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & \\ M & L & ger \\ & PD & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta R \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Sabe-se que, quando o valor de uma derivada de uma função é igual a zero, este é um ponto de mínimo ou máximo. Devido a isto, o vetor linha PD é a linearização das derivadas parciais da equação de perda de potência ativa, associada às linhas de transmissão da área crítica, em relação às variáveis de estado do sistema. Com a finalidade de minimizar as perdas, as derivadas parciais, e conseqüentemente Δp , devem ser iguais a zero. Nota-se que Δp igual a zero pode ser associado a um ponto de máximo, porém isso é evitado com a escolha dos geradores que serão redespachados.

O redespacho é modelado através da inclusão da nova coluna *ger* correspondente aos geradores escolhidos para reduzir as perdas de potência ativa. Os valores associados a esses geradores são definidos como 1 (gerador designado a elevar sua geração) e como -1 (gerador designado a reduzir sua geração). Os demais elementos da coluna *ger* são nulos. À medida que um gerador é escolhido para aumentar sua geração em um valor (não especificado) ΔR , outro gerador é escolhido para reduzir sua geração nesse mesmo valor ΔR .

Esse novo conjunto de equações é resolvido pelo método de Newton-Raphson. Suas saídas são as variáveis de estado tradicionais (ângulos de fase nas barras PV e PQ e níveis de tensão nas barras PQ) e o desvio de potência ativa nas máquinas escolhidas para reduzir as perdas ΔR . A exemplo do valor de redespacho na questão de retirada de sobrecarga observa-se, da equação (5.11), que a redução das perdas não é uma função explícita do redespacho. A cada iteração, as perdas locais são calculadas. O processo converge para um valor de redespacho correspondente ao mínimo de perdas locais.

Se o redespacho de geração não for efetivo para a redução das perdas, pode-se tentar a compensação local de potência reativa. A idéia é melhorar o perfil de tensão da barra crítica para reduzir o carregamento de potência reativa e assim elevar a transmissão de potência ativa. Essa abordagem é formulada da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & \\ M & L & ger \\ & PD & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta C \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Pode-se observar a similaridade entre as equações (5.11) e (5.12). Na primeira ΔR é associado ao montante do redespacho, enquanto que, na última equação, ΔC refere-se à compensação de potência reativa.

5.3 Função Energia Incorporada à Matriz Jacobiana

Conforme já discutido no Capítulo 3, a aplicação da função energia em análises de estabilidade de tensão baseia-se na medida de diferença de energia entre a solução estável e a solução instável. Nesta aplicação, somente a energia potencial do sistema é necessária. À medida que aumenta o carregamento do sistema, a distância entre as soluções estável e instável se reduz e a energia do sistema decresce. No ponto de colapso, as soluções estáveis e instáveis tornam-se uma só e a energia do sistema tende a zero. Esse comportamento da energia possibilita a obtenção de informações a respeito da margem de carga do sistema.

A proposta, que será apresentada a seguir, tem por objetivo a determinação da margem de carga de um sistema de potência até o ponto de colapso, utilizando a técnica da função energia, com o auxílio da matriz Jacobiana estendida. A idéia é incorporar na matriz Jacobiana as equações da função energia – de modo a se obter, ao final do processo iterativo, um valor próximo de zero na energia do sistema – e as equações do fluxo de carga para se obter as atualizações das soluções instáveis a cada iteração

A metodologia consiste na elevação do carregamento de um sistema através do parâmetro λ , que é o fator de crescimento da carga. Consiste também na inclusão de uma nova linha contendo as derivadas parciais da equação da função energia em relação às variáveis de estado, aumentando assim a matriz Jacobiana do sistema. A inclusão da nova linha torna necessária uma nova coluna, que é associada às derivadas parciais das equações de potência ativa e reativa e da função energia em relação ao parâmetro λ . Portanto, tem-se o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta FE \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ M & L & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial FE}{\partial \theta} & \frac{\partial FE}{\partial V} & \frac{\partial FE}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Onde H , N , M e L são as sub-matrizes do Jacobiano do fluxo de carga, a última linha contém as derivadas parciais da equação da função energia em relação às variáveis de estado e a última coluna contém as derivadas parciais das equações de potência ativa e reativa e da função energia em relação ao parâmetro λ . ΔFE é a equação de “mismatch” da função energia e $\Delta\lambda$ o fator de crescimento da carga.

À medida que o carregamento do sistema se eleva, a energia do sistema diminui até que, ao se aproximar do ponto de bifurcação, o conjunto de equações (5.13) converge com as equações de “mismatches” ΔP , ΔQ e ΔFE tendendo a zero. Ao fim do processo iterativo a margem de carga do sistema é obtida.

Como discutido no Capítulo 3, o cálculo da diferença de energia entre as soluções estável e instável depende, obviamente, da solução instável. Esta solução pode ser obtida fora do processo iterativo, sendo atualizada a cada iteração. Para evitar problemas de convergência optou-se, neste trabalho, por uma formulação completa, isto é, as soluções estáveis e instáveis são calculadas simultaneamente. Portanto, são incorporadas à matriz Jacobiana as derivadas parciais das equações de potência ativa e reativa em relação às variáveis de estado, utilizando os valores da solução instável. Com essa nova formulação obtém-se um novo conjunto de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_u \\ \Delta Q_u \\ \Delta FE \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & & & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ M & L & & & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \\ & & H_u & N_u & \frac{\partial P_u}{\partial \lambda} \\ & & M_u & L_u & \frac{\partial Q_u}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial FE}{\partial \theta} & \frac{\partial FE}{\partial V} & \frac{\partial FE_u}{\partial \theta} & \frac{\partial FE_u}{\partial V} & \frac{\partial FE}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \theta_u \\ \Delta V_u \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Onde H , N , M e L são as mesmas sub-matrizes da equação (5.13) e H_u , N_u , M_u e L_u são as sub-matrizes do Jacobiano do fluxo de carga contendo as derivadas parciais das

equações de potência ativa e reativa em relação às variáveis de estado, utilizando os valores da solução instável. ΔP_u e ΔQ_u são as equações de “mismatches” de potência ativa e reativa do fluxo de carga que utiliza os valores da solução instável. A última linha contém as derivadas parciais da equação da função energia em relação às variáveis de estado, utilizando os valores das soluções estáveis e instáveis. A última coluna contém as derivadas parciais das equações de potência ativa e reativa e da função energia em relação ao parâmetro λ , utilizando os valores das soluções estáveis e instáveis. Os elementos ΔP , ΔQ , ΔFE e $\Delta \lambda$ são os mesmos da equação (5.13), enquanto que $\Delta \theta$, ΔV , $\Delta \theta_u$ e ΔV_u são os vetores de correção das soluções estável e instável. Esta matriz Jacobiana estendida não é singular no ponto de colapso de tensão, o que permite o cálculo da margem de carga do sistema a partir da solução das equações do fluxo de carga utilizando o método de Newton-Raphson convencional.

O processo se inicia com um fluxo de carga sendo executado, antes da incorporação das equações da função energia, com o objetivo de obter a barra crítica do sistema, através do método do vetor tangente. À medida que aumenta o carregamento do sistema a barra crítica pode mudar, devendo-se obtê-la a cada alteração do fator de crescimento da carga $\Delta \lambda$. Em seguida, a solução instável do sistema é calculada nesse ponto de operação, a partir de uma iteração de Newton-Raphson com uma estimativa de tensão de valor reduzido na barra crítica, considerando que a área onde está localizada essa barra converge para a solução instável com valores de tensão mais baixos.

Esse novo conjunto de equações é resolvido pelo método de Newton-Raphson. A convergência é obtida normalmente sem nenhum problema numérico. O processo converge quando os valores de “mismatches” se tornam menores do que a tolerância especificada. Suas saídas são as soluções estáveis e instáveis das variáveis de estado (ângulos de fase nas barras PV e PQ e níveis de tensão nas barras PQ) e a margem de carga do sistema, que é obtida a partir do fator de crescimento da carga $\Delta \lambda$.

A seguir, o algoritmo do método proposto neste trabalho é apresentado:

1. Executa um fluxo de carga, antes da incorporação das equações da função energia;
2. A barra crítica do sistema é obtida, através do método do vetor tangente. À medida que aumenta o carregamento do sistema a barra crítica pode mudar, devendo-se obtê-la a cada alteração do fator de crescimento da carga $\Delta\lambda$;
3. Calcula a solução instável do sistema neste ponto de operação;
4. Incorpora as equações da função energia na matriz Jacobiana;
5. Inclui na matriz Jacobiana uma nova coluna, associada às derivadas parciais das equações de potência ativa, reativa e da função energia em relação ao parâmetro λ ;
6. Resolve esse novo conjunto de equações do fluxo de carga através do método de Newton-Raphson;
7. O processo converge quando os valores de “mismatches” se tornam menores do que a tolerância especificada;
8. As saídas do programa são: as soluções estáveis e instáveis das variáveis de estado e a margem de carga do sistema, que é obtida a partir do fator de crescimento de carga $\Delta\lambda$.

Os Capítulos 3, 4 e 5 apresentaram a proposta deste trabalho. O capítulo seguinte mostra os resultados desta metodologia, através de simulações realizadas em sistemas teste. Os resultados são comparados com o método da continuação, que é usado como referência.

Capítulo 6

RESULTADOS

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados alguns resultados obtidos a partir das propostas apresentadas Capítulos 3, 4 e 5. Nas simulações, a fim de comprovar os resultados, foram testados os seguintes sistemas:

- ⇒ 6 barras IEEE
- ⇒ 14 barras IEEE
- ⇒ 30 barras IEEE
- ⇒ 57 barras IEEE
- ⇒ 118 barras IEEE
- ⇒ 214 barras Sistema Nordeste do Brasil equivalentado

Inicialmente, todos os sistemas foram simulados com limites, aplicando-se o método da continuação, utilizando-se um programa já existente desenvolvido em Matlab [60]. Desta maneira, os valores de margens de carga e tempos de processamento servirão como referências para as demais simulações. As margens de carga estão em pu, em relação ao carregamento inicial do sistema, e os tempos em segundos. Os resultados são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores de referência – Método da Continuação

Sistema (nº de barras)	Margem de Carga (pu)	Tempo (s)
6	1,2853	9,39
14	2,1440	11,58
30	1,8070	19,76
57	1,4836	28,71
118	2,2310	598,78
214	1,230	212,46

6.2 Resultados da Aplicação da Função Energia para o Cálculo da Margem de Carga

O método da função energia aplicado em estudos de estabilidade de tensão, proposto nos Capítulos 3 e 5, é comparado com os resultados obtidos através do método da continuação, mostrados na Tabela 6.1. A Tabela 6.2 apresenta o resumo dos resultados das simulações com limites, com a aplicação do método proposto.

Tabela 6.2 – Método da Função Energia

Sistema (nº de barras)	Margem de Carga (pu)	Tempo (pu)
6	1,2832	0,50
14	2,1421	0,49
30	1,8045	0,30
57	1,4760	0,29
118	2,2490	0,07
214	1,270	0,62

Comparando-se os resultados das Tabelas 6.1 e 6.2, observa-se que as diferenças entre as margens de carga não são significativas, variando de 0,2% (para os sistemas menores) a 0,9% (para os sistemas maiores). A diferença entre as margens de carga do sistema Nordeste de 214 barras, no entanto, foi mais significativa, alcançando 3,25%. Ressalta-se a grande diferença entre os dois métodos com relação ao desempenho computacional. Isto se deve ao elevado número de iterações do método da continuação, que demanda a solução de vários fluxos de carga para calcular a margem de carga de um sistema de potência. Os tempos de processamento do método da continuação são bem maiores do que os tempos de processamento do método da função energia, que estão em pu com relação aos tempos do método da continuação. Esses resultados mostram que o método proposto neste trabalho obtém as mesmas margens de carga do método da continuação, com um desempenho computacional muito superior.

Tomando-se como exemplo o sistema teste de 6 barras do IEEE, vários aspectos interessantes do método proposto podem ser avaliados. Na estrutura do programa desenvolvido, o erro no cálculo da função energia é desacoplado do erro no cálculo das equações do fluxo de carga; permitindo uma precisão relativamente maior nos resultados. A função energia pode ser calculada para uma barra qualquer do sistema ou para todas as barras. No ponto de colapso, as tensões estáveis e instáveis de todas as barras se igualam. Neste trabalho, a função energia é calculada em relação à barra crítica.

O processo se inicia a partir de um fluxo de carga convergido – antes da incorporação da equação da função energia – e do uso do vetor tangente na obtenção da barra crítica do sistema. Em seguida, as soluções instáveis do sistema são calculadas nesse ponto de operação, a partir de uma iteração de Newton-Raphson, com uma estimativa de tensão de valor reduzido de 0,3 pu e de ângulo de -30° para a barra crítica. Para o sistema equivalente do Nordeste de 214 barras, a estimativa inicial para o cálculo da solução instável foi de 0,5 pu para a tensão e de 90° para o ângulo da barra crítica, valores esses coerentes com o perfil do sistema. Como a tensão na barra crítica tem um valor reduzido em relação às demais barras do sistema, torna-se mais fácil encontrar as soluções instáveis do sistema a partir da normalização do vetor do erro, pois a área crítica converge para a solução instável com

valores mais baixos de tensão. A partir desse ponto operativo, as soluções estáveis e instáveis são calculadas simultaneamente dentro do processo iterativo. Houve uma tentativa inicial de se obter as soluções instáveis do sistema fora da formulação da função energia para cada acréscimo de carga do sistema. Porém, nos casos simulados com limites houve problemas de convergência que inviabilizaram essa formulação.

À medida que se aumenta o carregamento do sistema as distâncias entre as soluções estáveis e instáveis se reduzem e a energia do sistema decresce de forma quase linear. No ponto de colapso, as soluções estáveis e instáveis tornam-se uma só e a energia do sistema tende a zero. No fim do processo iterativo obtém-se a margem de carga do sistema.

O sistema de 6 barras do IEEE é apresentado na Figura 6.1. Os dados deste sistema estão descritos a seguir:

Dados de geração:

Gerador 1 (barra *swing*): -10 / 120Mvar

Gerador 2: 50MW (-10 / 120Mvar)

Gerador 3: 60MW (-10 / 120Mvar)

Dados da carga:

Barras 4, 5 e 6: 70MW / 70Mvar

Os valores iniciais das soluções estáveis e instáveis, obtidos nas simulações, com e sem limites, são apresentados nas Tabelas 6.3 e 6.4 a seguir:

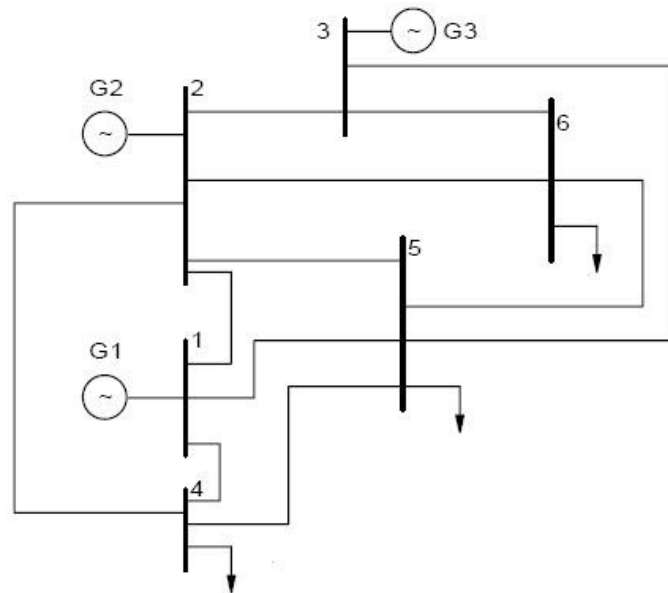


Figura 6.1 – Sistema de 6 barras do IEEE

Tabela 6.3 – Soluções estáveis e instáveis iniciais, com limites

Nº da barra	Solução Estável		Solução Instável	
	V (pu)	θ (graus)	V (pu)	θ (graus)
1	1,0500	0,000	1,0500	0,000
2	0,9018	-0,779	0,5902	1,673
3	0,8567	-0,286	0,3994	7,569
4	0,8728	-3,019	0,6125	-4,864
5	0,8306	-3,667	0,4339	-7,523
6	0,8051	-3,317	0,2399	-11,424

Tabela 6.4 – Soluções estáveis e instáveis iniciais, sem limites

Nº da barra	Solução Estável		Solução Instável	
	V (pu)	θ (graus)	V (pu)	θ (graus)
1	1,0500	0,000	1,0500	0,000
2	1,0500	-3,724	1,0500	-52,374
3	1,0700	-4,331	1,0700	-68,863
4	0,9864	-4,176	0,7975	-37,162
5	0,9797	-5,225	0,0799	-68,468
6	1,0014	-5,970	0,8135	-66,790

Pode-se observar que as soluções estáveis e instáveis estão bastante distantes, como era previsto, exceto para Barra 1 que é a barra *swing*, no caso com limites; e para as Barras 1,2 e 3, barras *swing* e *PV*, respectivamente, no caso sem limites. A barra crítica obtida pelo método do vetor tangente é a Barra 6 para o caso com limites; e Barra 5 para o caso sem limites. Observa-se, pelos resultados das soluções instáveis, que estas soluções convergem para valores reduzidos de tensão a partir de uma estimativa inicial de 0,3 pu na barra crítica.

Ao final de toda a simulação, quando o sistema atinge o ponto de colapso, as soluções estáveis e instáveis se igualam e os seguintes resultados são obtidos, com e sem limites, conforme mostrados nas Tabelas 6.5 e 6.6 a seguir:

Tabela 6.5 – Soluções estáveis e instáveis no ponto de colapso, com limites

Nº da barra	Solução Estável		Solução Instável	
	V (pu)	θ (graus)	V (pu)	θ (graus)
1	1,0500	0,000	1,0500	0,000
2	0,7308	0,200	0,7280	0,218
3	0,6218	2,263	0,6179	2,326
4	0,7044	-4,755	0,7020	-4,778
5	0,6004	-6,280	0,5968	-6,325
6	0,5269	-5,718	0,5222	-5,775

Tabela 6.6 – Soluções estáveis e instáveis no ponto de colapso, sem limites

Nº da barra	Solução Estável		Solução Instável	
	V (pu)	θ (graus)	V (pu)	θ (graus)
1	1,0500	0,000	1,0500	0,000
2	1,0500	-41,717	1,0500	-41,757
3	1,0700	-49,950	1,0700	-50,000
4	0,6560	-35,758	0,6560	-35,781
5	0,4064	-49,732	0,4059	-49,778
6	0,7243	-55,496	0,7243	-55,536

Esses resultados demonstram a eficiência do método proposto neste trabalho. As diferenças entre as soluções estáveis e instáveis são inferiores a 0,5% no ponto de colapso, quando a energia do sistema se anula. Conforme mencionado anteriormente, a barra crítica do caso com limites é a Barra 6, enquanto que para o caso sem limites a barra crítica é a Barra 5.

Considerando que as soluções estáveis e instáveis são calculadas simultaneamente, dentro do processo iterativo, durante o aumento do carregamento do sistema, as curvas *PV* podem ser traçadas, já considerando a parte inferior (instável) destas curvas. As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam essas curvas para o sistema de 6 barras do IEEE, com e sem limites, respectivamente.

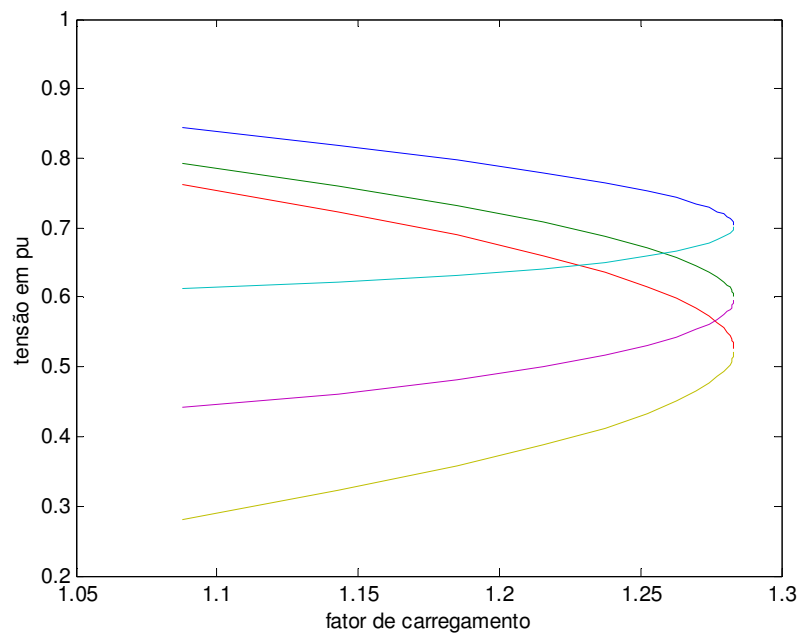


Figura 6.2 – Curvas PV – 6 barras IEEE, com limites

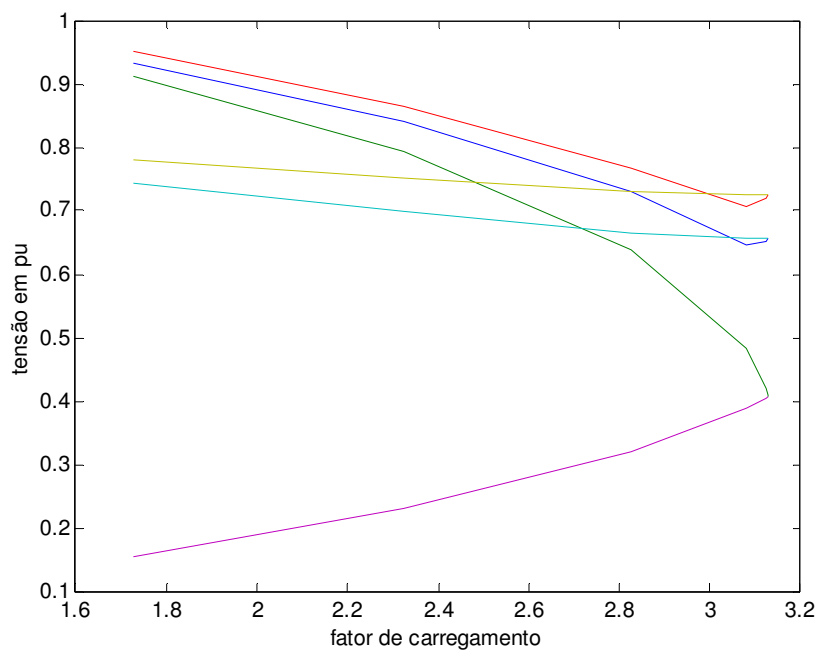


Figura 6.3 – Curvas PV – 6 barras IEEE, sem limites

Para ilustrar, a Figura 6.4 mostra os gráficos das curvas *PV* do sistema de 14 barras do IEEE, com limites.

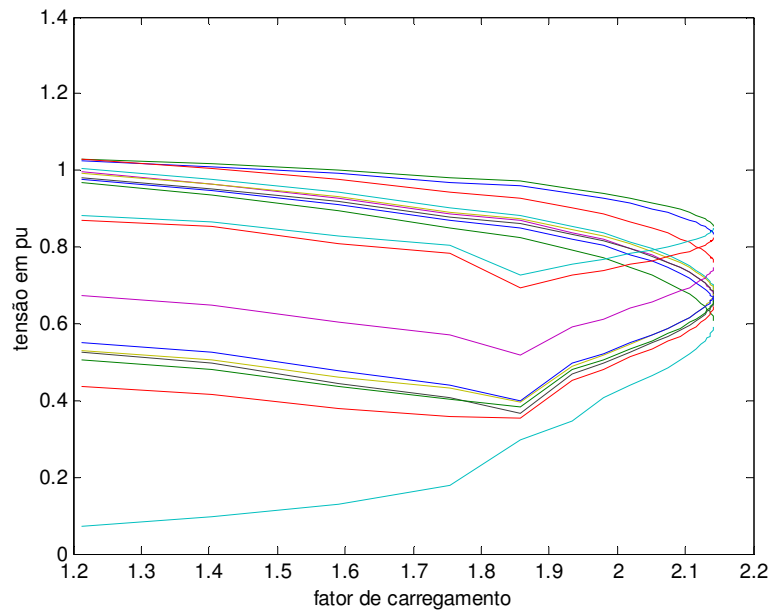


Figura 6.4 – Curvas PV – 14 barras IEEE, com limites

O método mostra também o comportamento da energia do sistema, que decresce à medida que o carregamento do sistema aumenta, até se anular no ponto de colapso. As Figuras 6.5 a 6.11 apresentam os gráficos da energia dos sistemas simulados.

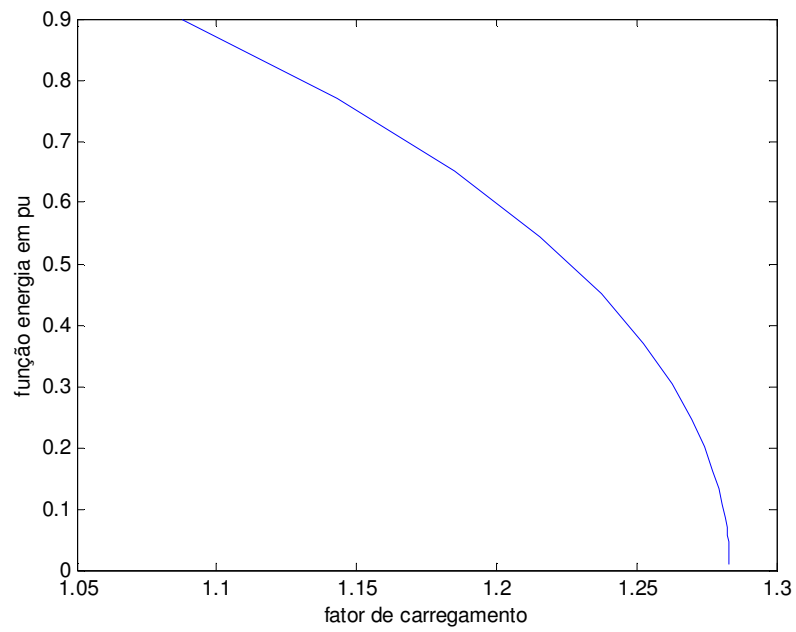


Figura 6.5 – Função Energia – 6 barras IEEE, com limites

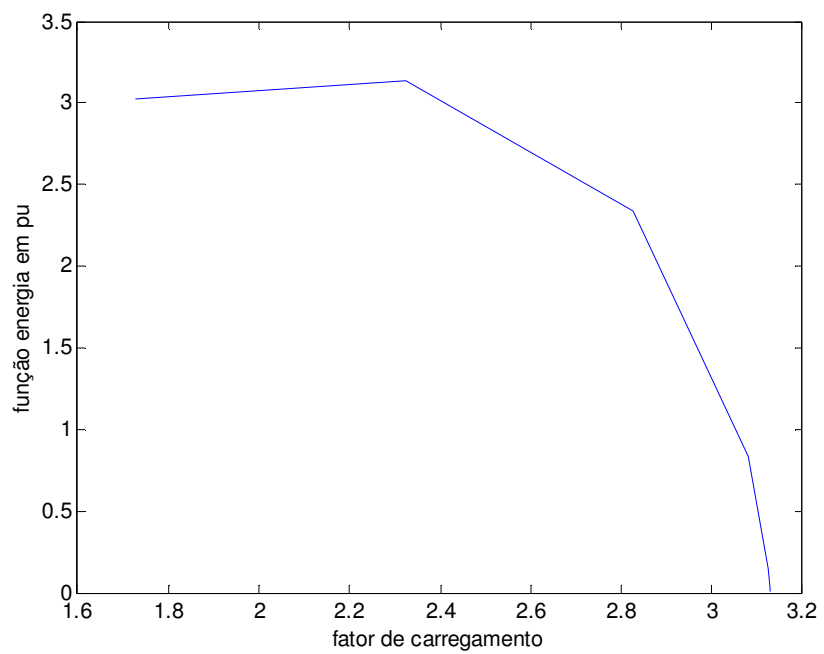


Figura 6.6 – Função Energia – 6 barras IEEE, sem limites

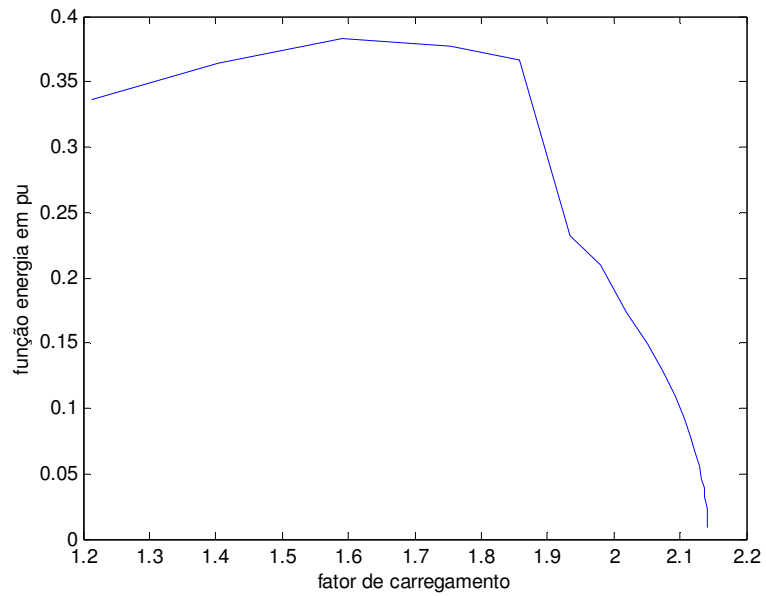


Figura 6.7 – Função Energia – 14 barras IEEE, com limites

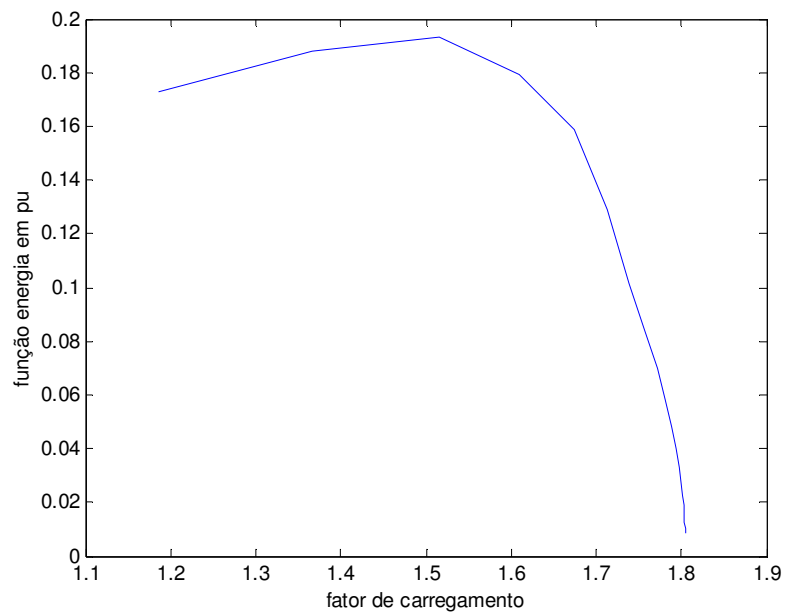


Figura 6.8 – Função Energia – 30 barras IEEE, com limites

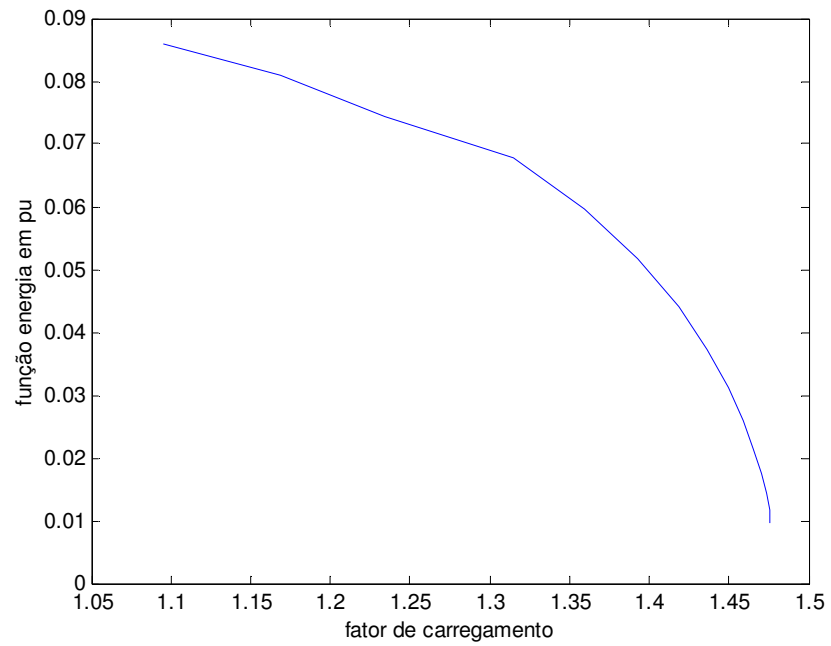


Figura 6.9 – Função Energia – 57 barras IEEE, com limites

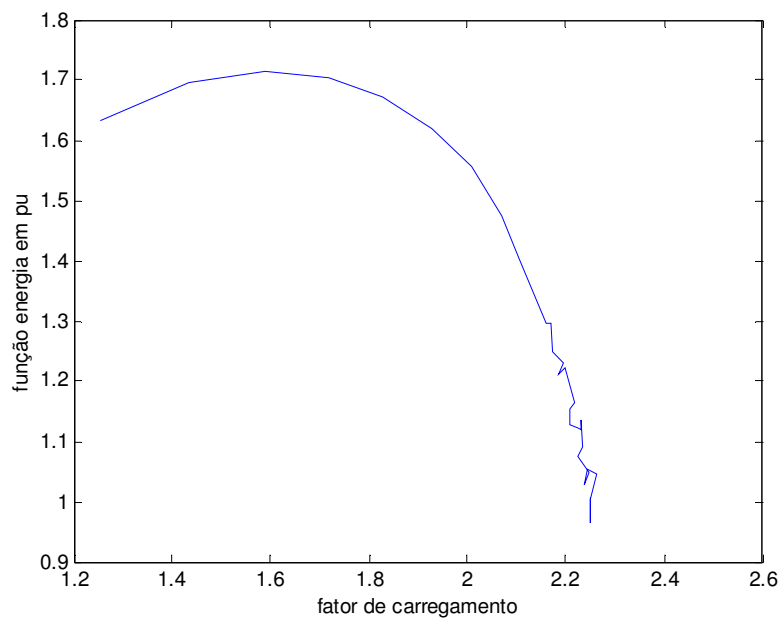


Figura 6.10 – Função Energia – 118 barras IEEE, com limites

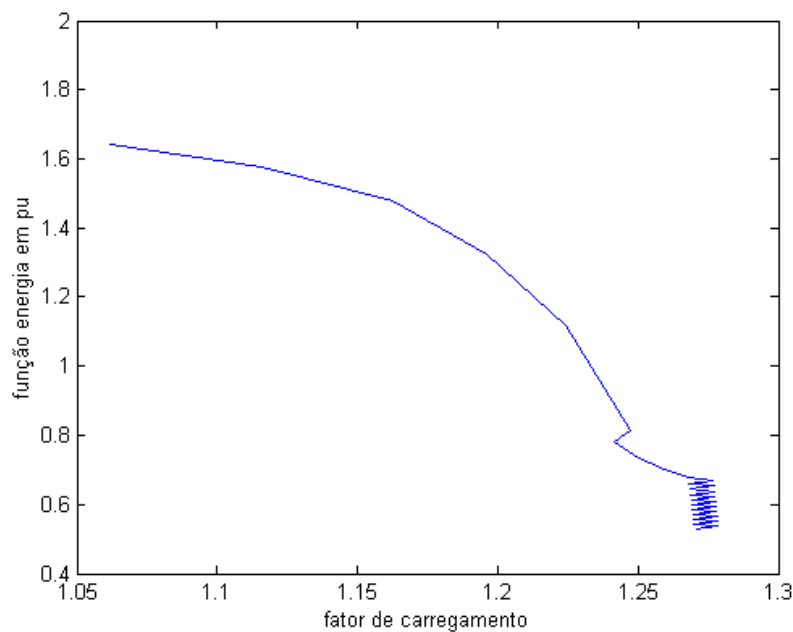


Figura 6.11 – Função Energia – 214 barras NE, com limites

6.3 Resultados da Aplicação da Função Energia para o Cálculo da Margem de Carga em Coordenadas Retangulares

O método da função energia também foi usado na formulação de coordenadas retangulares do fluxo de carga. Esta aplicação teve por objetivo verificar o comportamento do método em coordenadas retangulares, tendo em vista que, segundo a referência [42], as características de convergência do fluxo de carga utilizando o método de Newton-Raphson, expresso em coordenadas retangulares, facilitam o cálculo das soluções instáveis do sistema. Os resultados são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Método da Função Energia em Coordenadas Retangulares

Sistema (nº de barras)	Margem de Carga (pu)	Tempo (pu)
6	1,2832	0,44
14	2,1421	0,43
30	1,8046	0,28
57	1,4761	0,33
118	2,2523	0,10
214	1,2540	0,94

Comparando-se os resultados do método da função energia em coordenadas polares e retangulares, apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.7, respectivamente, observa-se que as margens de carga e os tempos de processamento são similares, exceto pelo tempo de processamento do sistema NE de 214 barras. Esses resultados mostram que a formulação retangular pode ser utilizada, obtendo-se também bons resultados.

Tomando-se como exemplo o sistema teste de 6 barras do IEEE, as Tabelas 6.8 e 6.9, a seguir, apresentam os valores das soluções estáveis e instáveis, obtidos em coordenadas retangulares. Sendo e a parte real e f a parte imaginária da tensão expressa em coordenadas retangulares.

Tabela 6.8 – Soluções estáveis e instáveis iniciais

Nº da barra	Solução Estável		Solução Instável	
	e (pu)	f (pu)	e (pu)	f (pu)
1	1,0500	0,0000	1,0500	0,0000
2	0,9017	-0,0122	0,5901	0,0172
3	0,8567	-0,0043	0,3962	0,0526
4	0,8716	-0,0460	0,6104	-0,0519
5	0,8289	-0,0531	0,4304	-0,0568
6	0,8038	-0,0466	0,2354	-0,0476

Tabela 6.9 – Soluções estáveis e instáveis no ponto de colapso

Nº da barra	Solução Estável		Solução Instável	
	e (pu)	f (pu)	e (pu)	f (pu)
1	1,0500	0,0000	1,0500	0,0000
2	0,7306	0,0025	0,7282	0,0028
3	0,6211	0,0246	0,6176	0,0251
4	0,7019	-0,0584	0,6997	-0,0585
5	0,5966	-0,0657	0,5934	-0,0658
6	0,5240	-0,0525	0,5199	-0,0525

Similarmente à formulação em coordenadas polares, pode-se observar que as soluções estáveis e instáveis estão bastante distantes, como era previsto, exceto para barra 1 que é a barra *swing*. Observa-se, pelos resultados das soluções instáveis, que estas soluções convergem para valores reduzidos de tensão, a partir de uma estimativa inicial de $e=0,25$ pu e $f=-0,15$ pu na barra crítica. Ao final de toda a simulação, quando o sistema atinge o ponto de colapso, as soluções estáveis e instáveis se igualam, como era esperado.

Considerando que as soluções estáveis e instáveis também são calculadas simultaneamente, dentro do processo iterativo durante o aumento do carregamento do sistema, as curvas *PV* podem ser traçadas. Neste caso, em função de e , considerando a parte inferior (instável) destas curvas. A Figura 6.12 apresenta as curvas para o sistema de 6 barras do IEEE.

A Figura 6.13 mostra o comportamento da energia do sistema, similar à formulação em coordenadas polares, também para o caso de 6 barras do IEEE.

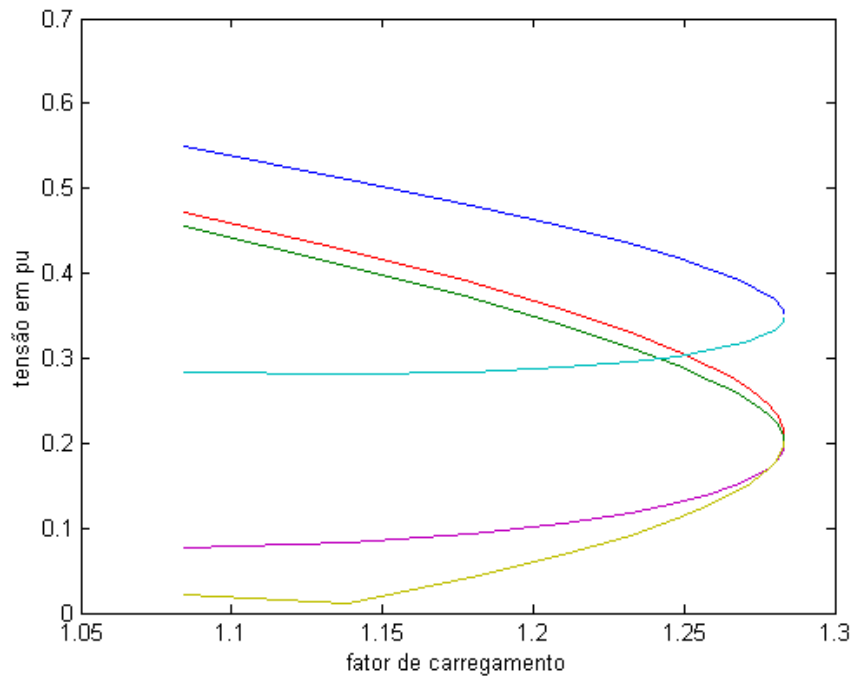


Figura 6.12 – Curvas PV – 6 barras IEEE, com limites

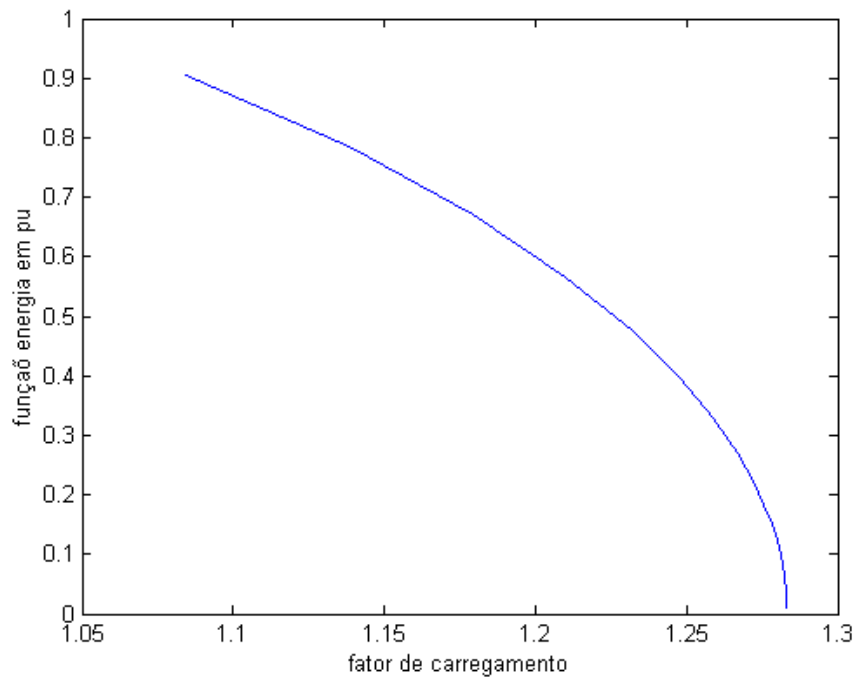


Figura 6.13 – Função Energia – 6 barras IEEE, com limites

6.4 Aplicação do Método em Análise de Corte de Carga

O método pode também ser aplicado em casos de corte de carga. Na simulação realizada no sistema de 6 barras do IEEE, o sistema parte de um ponto operativo além do seu limite de máximo carregamento, conhecido previamente. À medida que a carga é gradativamente reduzida, o sistema atinge o ponto de colapso onde a energia do sistema é nula. Para o sistema de 6 barras, o limite de carregamento é de 1,2832 pu e a estimativa inicial é de 2,0 pu. As Figuras 6.14 e 6.15 mostram os resultados obtidos, apresentando os gráficos das curvas *PV* e da função energia. Observa-se um comportamento “invertido” destes gráficos, denotando realmente um alívio de carregamento no sistema.

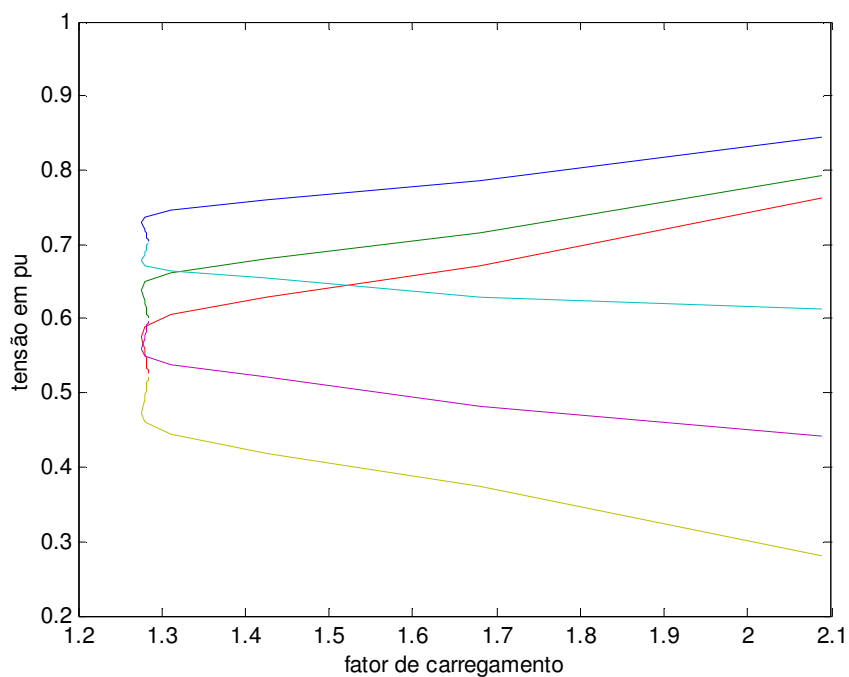


Figura 6.14 – Curvas PV – 6 barras IEEE, com corte de carga

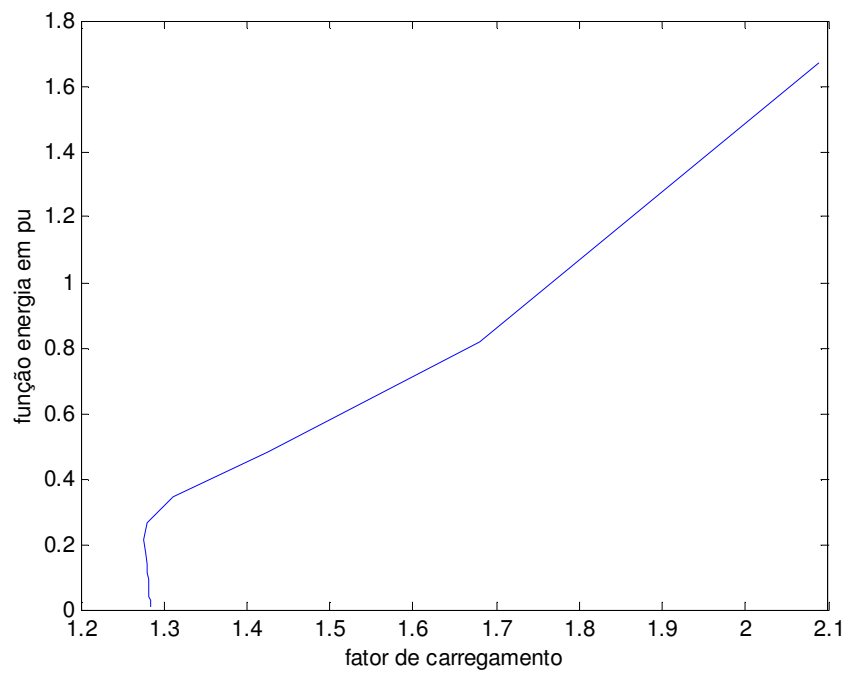


Figura 6.15 – Função Energia – 6 barras IEEE, com corte de carga

Capítulo 7

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foi desenvolvida uma nova metodologia de utilização da função energia em estudos de estabilidade de tensão. No método da função energia para a análise de estabilidade de tensão apenas a energia potencial do sistema é necessária, dispensando a inclusão do amortecimento e dos modelos complexos dos geradores. Conceitualmente, a aplicação da função energia baseia-se na medida de diferença de energia entre a solução estável e a solução instável do sistema. Essa diferença de energia é um bom indicativo da distância do sistema para o colapso de tensão. À medida que aumenta o carregamento do sistema, a distância entre estas soluções se reduz e a energia do sistema decresce. No ponto de colapso, as soluções estáveis e instáveis tornam-se uma só e a energia do sistema tende a zero. Este comportamento quase linear da energia possibilita, a partir de um ponto operativo de sistema, uma boa estimativa da distância até o ponto de colapso e, conseqüentemente, a obtenção de informações a respeito da margem de carga do sistema.

O cálculo da diferença de energia entre as soluções estáveis e instáveis depende, obviamente, da solução instável, também conhecida como “solução de baixa tensão”. Para sistemas elétricos de potência de grande porte, a determinação da solução instável torna-se um problema complexo. Neste trabalho um método para a determinação das soluções instáveis das equações do fluxo de carga também é proposto. A idéia é utilizar uma abordagem de tentativa e erro para a determinação dessas soluções instáveis, através de um fluxo de carga convencional, no início do processo. A questão fundamental é encontrar uma boa estimativa inicial para que o método convirja para a solução instável. Esta questão é solucionada identificando-se antecipadamente a barra crítica do sistema através do

método do vetor tangente. Após a identificação da barra crítica, inicia-se uma iteração de Newton-Raphson com uma estimativa de tensão de valor reduzido nessa barra, considerando que a área onde está localizada a barra crítica converge para a solução instável crítica, com um valor reduzido de tensão e com o menor valor de energia.

A metodologia proposta tem por objetivo a determinação da margem de carga de um sistema elétrico de potência até o ponto de colapso, utilizando a técnica da função energia, com o auxílio da matriz Jacobiana estendida. Incorporam-se na matriz Jacobiana as equações da função energia – de modo a se obter, ao final do processo iterativo, um valor próximo de zero para a energia do sistema – e as equações do fluxo de carga para se obter as atualizações das soluções instáveis em cada iteração.

Um programa computacional foi desenvolvido em Matlab, contemplando as propostas descritas no trabalho, e alguns sistemas testes foram simulados. O método da continuação foi utilizado como referência e os resultados obtidos das duas metodologias foram comparados, com o objetivo de validar a proposta apresentada.

A partir desses resultados, alguns aspectos devem ser ressaltados:

- ⇒ O esforço computacional do método da função energia é o mesmo do método direto, pois as formulações dos dois métodos têm a mesma dimensão $2n + 1$. No entanto, diferentemente do método direto, o método da função energia traça o diagrama de bifurcação, o que faz com que a função energia permita que o sistema opere em pontos diferentes da curva PV , podendo-se definir algumas regiões operativas – por exemplo: região segura, alerta e insegura.
- ⇒ A metodologia também foi desenvolvida em coordenadas retangulares, apresentando resultados satisfatórios.

- ⇒ A complexidade do algoritmo proposto é menor do que a do método da continuação, o que proporciona um ganho de tempo computacional significativo.
- ⇒ A teoria matemática de sistemas dinâmicos mostra que a inserção de um pólo faz com que o pólo dominante (menor parte real dos pólos complexos) aproxime-se mais ainda do eixo imaginário do plano complexo. Isto mostra que a função energia é reduzida à medida que o sistema é sobrecarregado.
- ⇒ Consistência do cálculo das soluções instáveis do sistema a partir do processo de Newton-Raphson, com uma estimativa de tensão de valor reduzido na barra crítica.
- ⇒ Aplicabilidade da utilização da técnica da função energia com o auxílio de uma matriz Jacobiana estendida. Esta matriz não é singular no ponto de colapso de tensão, o que permite o cálculo da margem de carga do sistema a partir da solução das equações do fluxo de carga utilizando o método de Newton-Raphson convencional.
- ⇒ A metodologia também pode ser usada para a determinação de corte de carga, tendo apresentado resultados bastante satisfatórios.

Propostas de trabalhos futuros:

- ⇒ A metodologia pode ser utilizada para a análise de contingências e segurança de sistemas elétricos de potência.
- ⇒ Aprofundar a técnica de cálculo das soluções instáveis das equações do fluxo de carga, comprovando sua eficiência em grandes sistemas elétricos de potência.
- ⇒ Aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho no sistema interligado nacional.

Referências Bibliográficas

- [1] TAYLOR, C. W., **Power System Voltage Stability**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [2] TAYLOR, C. W. et al, **Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena**. CIGRÉ Task Force 38-02-10. 1992.
- [3] IEEE/CIGRÉ Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, **Definition and classification of power system stability**. IEEE Transactions on Power Systems, vol.19, n°. 3, Aug. 2004, pp. 1387-1401.
- [4] MARTINS, A. C. B. et al, **Avaliação de soluções para o fenômeno da instabilidade de tensão no sistema interligado Sul/Sudeste brasileiro**. VI SEPOPE. Salvador: maio 1998.
- [5] GCOI – Grupo Coordenador para Operação Interligada, **Análise das perturbações dos dias 24 e 25/04/1997 no sistema interligado S/SE/CO**, Relatório SCO/SCEL-01/97, 1997.
- [6] ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., **New Techniques to Efficiently Determine Proximity to Static Voltage Collapse**, PhD thesis, University of Waterloo, 1995.
- [7] PRADA, R. B., ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., VIEIRA FILHO, X. et al, **Phenomena characterization based on reactive control effects and system critical areas identification**. Proceedings of III Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning. Belo Horizonte, 1992.
- [8] GOMES, P., SANTOS, M. G., PRADA, R., **Introdução dos estudos sobre estabilidade de tensão no planejamento da operação elétrica**. Anais do XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Recife, 1993.
- [9] CAÑIZARES, C. A., **On bifurcation, voltage collapse and load modeling**. IEEE/PES 94 SM 512-4 PWRs, San Francisco, CA. July 1994.

- [10] CAÑIZARES, C. A., ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., QUINTANA, V. H., **Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse**. IEEE/PES Summer Meeting - Paper 95, SM 583-5 PWRS, Portland, July 1995.
- [11] ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., **Estabilidade de tensão: novas ferramentas de análise**. Universidade Federal de Itajubá, 1998. (Apostila do Instituto de Engenharia Elétrica).
- [12] VASCONCELOS, LUIZ FREDERICO B., **Aplicação do Método do Vetor Tangente na Análise de Estabilidade de Tensão do Sistema Chesf**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 1999.
- [13] GAO, B., MORISON, G. K., KUNDUR, P., **Voltage stability evaluation using modal analysis**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, n°. 4, pp.1529-1542, Nov. 1992.
- [14] CUTSEM, T. V., VOURNAS, C., **Voltage Stability of Electric Power Systems**. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [15] CAÑIZARES, C. A., ALVARADO, F. L., DeMARCO, C. L., DOBSON, I., LONG, W. F., **Point of collapse methods applied do ac/dc power systems**. IEEE Transactions on Power Systems, vol.7, n° 2, pp. 673-683, May 1992.
- [16] CAÑIZARES, C. A., ALVARADO, F. L., **Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, n° 1, pp.1-8, Feb. 1993.
- [17] LÖF, P. A. et al. **Fast calculation of a voltage stability index**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, n° 1, pp.54-64, Feb. 1992.
- [18] ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., **Determinação da barra crítica e do ponto de colapso pelo vetor tangente**. Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática. São Paulo, 1996.

- [19] CAÑIZARES, C. A., ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., QUINTANA, V. H., **New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors.** IEEE Transactions on Power Systems, 12, (3), pp. 1380-1387, August 1997.
- [20] ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., BRITO, N. H. M. N., **Ações de controle para prevenção de colapso de tensão: efeitos e restrições.** Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática. São Paulo, 1996.
- [21] CAÑIZARES, C. A. **Voltage Collapse and Transient Energy Function Analyses of AC/DC Systems.** PhD thesis, University of Wisconsin - Madison, 1991.
- [22] AJJARAPU, V., CHRISTY, C. **The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 1, pp.416-423, Feb. 1992.
- [23] MOHN, F. W., **Uso de Modelos Desacoplados em Estudos de Estabilidade de Tensão.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2005.
- [24] KUNDUR, P., **Power System Stability and Control.** Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [25] PAI, M. A., **Power System Stability. Analysis by the Direct Method of Lyapunov.** North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1981.
- [26] PAI, M. A., **Energy Function Analysis for Power System Stability.** Kluwer Academic Publishers, Boston, 1989.
- [27] JARDIM, J. L. A., **Advances in Power System Transient Stability Assessment Using Transient Energy Function Methods.** PhD thesis, University of London, 1994.
- [28] FOUAD, A. A., VITTAL, V., **Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method.** New Jersey: Prentice-Hall, 1992.
- [29] DeMARCO, C. L., OVERBYE, T. J., **An energy based security measure for assessing vulnerability to voltage collapse.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 2, May 1990.

- [30] OVERBYE, T. J., DeMARCO, C. L., **Voltage security enhancement using energy based sensitivities.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 3, Aug. 1991.
- [31] OVERBYE, T. J., DeMARCO, C. L., **Improved techniques for power systems voltage stability assessment using energy methods.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 4, Nov. 1991.
- [32] OVERBYE, T. J., **Use of energy methods for on-line assessment of power system voltage security.** IEEE PES 1992 Winter Power Meeting, paper # 92 WM 121-4 PWRS, Jan. 1992.
- [33] BRETAS, N. G., ALBERTO, L. F. C., **Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos.** Publicação EESC-USP. São Carlos – SP, 2000.
- [34] VARAIYA, P. P., WU, F. F., **Direct methods for transient stability analysis of power systems: recent results.** Proceedings of the IEEE, vol. 73, no. 12, Dec. 1985.
- [35] GUEDES, R. B. L., MARTINS, A. C. P., ALBERTO, L. F. C., BRETAS, N. G., **An extended energy function for voltage collapse analysis considering voltage dependent load models.** Proceedings of Powertech Conference. Bologna, Italy, June, 2003.
- [36] GUEDES, R. B. L., MARTINS, A. C. P., ALBERTO, L. F. C., BRETAS, N. G., **Extended Lyapunov function for power systems with transmission losses.** Proceedings of Powertech Conference. Bologna, Italy, June, 2003.
- [37] CHIANG, H-D., WU, F. F., VARAIYA, P. P., **Foundations of direct methods for power system transient stability analysis.** IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. CAS-34, no. 2, Feb. 1987, pp. 160-173.
- [38] CHIANG, H-D., WU, F. F., VARAIYA, P. P., **Foundations of the potential energy boundary surface method for power system transient stability analysis.** IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 35, no. 6, June 1988, pp. 712-729.

- [39] CHIANG, H-D., WU, F. F., VARAIYA, P. P., **A BCU method for direct analysis of power system transient stability.** IEEE Summer Meeting, 91 SM 423-4 PWRS 1991.
- [40] OVERBYE, T. J., PAI, M. A., SAUER, P. W., **Some aspects of the energy function approach to angle and voltage stability analysis in power systems.** Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control – IEEE, Tucson, Arizona. Dec. 1992.
- [41] TAMURA, Y., MORI, H., IWAMOTO, S., **Relationship between voltage instability and multiple load flow solutions in electric power systems.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, pp. 1115-1123, May 1983.
- [42] IBA, K., SUZUKI, H., EGAWA, M., WATANABE, T., **A method for finding multiple load flow solutions in bulk power systems.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. PWRS-5, pp. 582-591, May 1990.
- [43] ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., ROSA JUNIOR, C. B., LOPES, B. I. L., LEME, C. R., CARPINTEIRO, O. A. S., **A non-iterative load flow method as a tool for voltage stability studies.** IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 1, pp. 499-505, 2007.
- [44] TAMURA, Y., MORI, H., IWAMOTO, S., **Voltage instability proximity index (VIPI) based on multiple load flow solutions in ill-conditioned power systems.** Proc. 27th Conf. Decision and Control, Austin, Texas, Dec. 1988.
- [45] YORINO, N., HARADA, S., CHENG, H., **A method to approximate a closest loadability limit using multiple load flow solutions.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 1, Feb. 1997.
- [46] DeMARCO, C. L., OVERBYE, T. J., **Low voltage power flow solutions and their role in exit time based security measures for voltage collapse.** IEEE Proceedings of the 27th Conference on Decision and Control, Austin Texas, 1988.

- [47] TAMURA, Y., IBA, K., IWAMOTO, S., **A method for finding multiple load flow solutions for general power systems.** Proc. IEEE 1980 PES Winter Meeting, A80 043-0, New York, NY, Feb. 1980.
- [48] OVERBYE, T. J., KLUMP, R. P., **Effective calculation of power system low-voltage solutions.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 1, Feb. 1996.
- [49] GUEDES, R. B. L., **Cálculo das Soluções de Baixa Tensão das Equações de Fluxo de Carga através de Sistemas Dinâmicos Auxiliares e Função Energia Estendida com Modelo ZIP para Análise de Colapso de Tensão.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.
- [50] GUEDES, R. B. L., BRETAS, N. G., ALBERTO, L. F. C., **Power system low-voltage solutions using an auxiliary gradient system for voltage collapse purposes.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1528-1537, Aug. 2005.
- [51] CASTRO, C. A., **Improved method for the calculation of power systems low voltage solutions.** Electrical Power and Energy Systems, 24:503-513, 2002.
- [52] IBA, K., SUZUKI, H., EGAWA, M., WATANABE, T., **Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 2, pp. 584-593, May 1991.
- [53] DELBONI, L., EUGÊNIO, F., SOUZA, A. C. Z., HONÓRIO, L. M., **Análise de sobrecarga através do uso do Jacobiano de fluxo de carga.** XI ERIAC, Hernandarias – Paraguai, Maio de 2005.
- [54] ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., LOPES, B. I. L., **On multiple tap-blocking to avoid voltage collapse.** Electric Power Systems Research, vol. 67, no. 3, pp.225-231. Irlanda, 2003.
- [55] LOPES, B. I. L., ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., **An approach for under voltage load shedding.** Proceedings of Powertech Conference. Bologna, Italy, June, 2003.

- [56] ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., ALVARADO, F. L., GLAVIC, M., **Continuation power flow with overload and redispatch**. XXIII NAPS, pp. 26-31, Waterloo, Canada, Oct. 2000.
- [57] PRADA, R. B. et al., **Modelagem de LTC para a avaliação do carregamento da rede de transmissão e da estabilidade do controle de tensão**. VIII SEPOPE, Brasília, Maio de 2002.
- [58] ZHU, T. X., TSO, S. K., **An investigation into the OLTC effects on voltage collapse**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 2, May 2000.
- [59] CUTSEM, T. V., OTOMEGA, B., SERMANSON, V., **Reverse-logic control of load tap changers in emergency voltage conditions**. Proceedings of Powertech Conference. Bologna, Italy, June, 2003.
- [60] MATSUMOTO, E. Y., **Matlab 6.5 – Fundamentos de Programação**. Editora Érica, 2005.