



Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica - DSEE

MÉTODOS COMPUTACIONAIS BASEADOS NA FUNÇÃO DE ENERGIA PARA ANÁLISE DIRETA DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Vicente Leonardo Páucar Casas

Campinas-SP, Brasil

Junho de 1998

Este exemplar corresponde a redação final da tese	
defendida por	<u>Vicente Leonardo Páucar Casas</u>
	e aprovada pela Comissão
Julgada em	<u>09 / junho / 1998</u>
	<u>[Assinatura]</u>
	Orientador



Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica - DSEE

MÉTODOS COMPUTACIONAIS BASEADOS NA FUNÇÃO DE ENERGIA PARA ANÁLISE DIRETA DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor:

Vicente Leonardo Páucar Casas

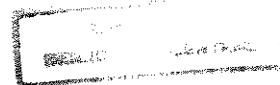
Orientador:

Prof. Dr. André Luiz Morelato França

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Campinas-SP, Brasil

Junho de 1998



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	J. Unicamp
	P28m
V.	Ex.
TE. VENC. BC/	35152
PRCO.	395/98
C.	D. ☒
PRCO.	R\$ 11,00
DATA	18/02/98
N.º CPD	

CM-00116076-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P28m	Páucar Casas, Vicente Leonardo Métodos computacionais baseados na função de energia para análise direta da estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica / Vicente Leonardo Páucar Casas.--Campinas, SP: [s.n.], 1998. Orientador: André Luiz Morelato França. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 1. Sistemas de energia elétrica – Controle. 2. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 3. Energia elétrica - Transmissão. I. França, André Luiz Morelato. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.
------	---



Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica - DSEE

Métodos Computacionais baseados na Função de Energia para Análise Direta da Estabilidade Transitória de Sistemas de Energia Elétrica

Vicente Leonardo Páucar Casas

Tese de Doutorado defendida e aprovada, em 09 de Junho de 1998, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. André Luiz Morelato França
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Djalma Mosqueira Falcão
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Ildemar Cassana Decker
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Alcir José Monticelli
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Ariovaldo Verandio Garcia
Universidade Estadual de Campinas

Campinas-SP, Brasil

Dedicatória:

*Em memória do meu pai Leonardo.
Ao meu filho Hans.*

Agradecimentos

A André Luiz Morelato França, pela amizade, pela paciência, pelos conhecimentos transmitidos e pela inestimável orientação a mim dispensada ao longo destes anos.

Ao Departamento de Sistemas de Energia Elétrica da UNICAMP, nas pessoas de seus professores: Alcir Monticelli, André Morelato, Ariovaldo Garcia, Carlos Castro Jr., Carlos Murari e Fujio Sato, pela amizade, colaboração e pelas excelentes condições de pesquisa que proporcionam aos estudantes da pós-graduação.

Aos amigos do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE/DSEE), pela convivência tão proveitosa e enriquecedora que sempre mantivemos.

A Lilian pelo seu incentivo, pela compreensão, e por ter me dado dois maravilhosos motivos de inspiração: Hans e Stephanie.

Ao meu irmão Walter pelo seu incentivo constante e à minha mãe Jovita pela sua preocupação.

Aos simpáticos amigos brasileiros que com sua amizade fizeram da minha agradável permanência em Campinas uma lembrança inesquecível.

Aos meus amigos e colegas peruanos, aqui na UNICAMP e em Lima, que de alguma maneira me ofereceram seu apoio. O apoio do meu amigo e colega Zócimo Ñaupari em Lima é reconhecido.

À “Universidad Nacional de Ingeniería” (UNI), “Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica” (FIEE) em Lima, Peru, pela concessão do meu afastamento e particularmente ao seu Decano, Prof. Miguel Sánchez.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Resumo

Páucar V.L., “Métodos Computacionais baseados na Função de Energia para Análise Direta da Estabilidade Transitória de Sistemas de Energia Elétrica”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 175 p., Campinas-SP, Brasil, 1998.

Este trabalho trata da aplicação do método direto baseado na função de energia para a análise da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência. Por meio da função de energia é possível determinar a margem de energia, um índice numérico que facilita a adoção de ações preventivas, corretivas e de controle para melhorar a estabilidade transitória e a segurança dinâmica dos sistemas de potência. Estudou-se a energia potencial nas proximidades do tempo crítico de eliminação de uma perturbação, mostrando um comportamento ainda não descrito na literatura. Como resultado desse estudo foi proposto um critério para identificar o tempo crítico a partir de simulação no tempo. Neste trabalho propõe-se ainda uma nova metodologia para o cálculo do ponto de equilíbrio instável de controle, que se mostrou mais eficiente e confiável que a metodologia existente. Essa metodologia incorpora um novo algoritmo de detecção do ponto de saída, bem como dois novos algoritmos numéricos de cálculo de pontos de equilíbrio. Diversos resultados de testes realizados em sistemas elétricos de pequeno e grande porte, operando sob estresse, são apresentados, confirmando a validade das propostas formuladas neste trabalho de pesquisa.

Palavras-chaves:

Ponto de Equilíbrio Instável, Função de Energia Transitória, Estabilidade Transitória, Segurança Dinâmica, Sistemas Elétricos de Potência.

Abstract

Páucar V.L., “Computer Methods based on Energy Function for Direct Analysis of Power Systems Transient Stability”, PhD. Thesis (in Portuguese), Electrical and Computer Engineering Faculty (FEEC), University of Campinas (UNICAMP), 175 p. Campinas-SP, Brazil, 1998.

This work deals with the application based on the direct method of the energy function for transient stability analysis of electrical power systems. By means of the energy function it is possible to determine the transient energy margin, a numerical index that can guide the adoption of corrective and control actions to improve the transient stability and the dynamic security of power systems. The behavior of the potential energy nearby the critical clearing time of a contingency was studied, being noted a behavior which not yet had been reported in the literature. As a result, a criterion is proposed to identify the critical clearing time from time domain simulation. In this work is also proposed a new methodology for the calculation of the controlling unstable equilibrium point, which is more efficient and reliable than the current methodology. This new methodology incorporates a novel algorithm for exit point detection and two new numerical algorithms for equilibrium points computation. The test results obtained using both small and large-scale electrical power systems, operating in stressed conditions, validate the proposals formulated in this research work.

Keywords:

Unstable Equilibrium Point, Transient Energy Function, Transient Stability, Dynamic Security, Electrical Power Systems.

Resumen

Páucar V.L., “Métodos Computacionales basados en la Función de Energía para el Análisis Directo de la Estabilidad Transitoria de Sistemas de Energía Eléctrica”, Tesis de Doctorado (en portugués), Facultad de Ingeniería Eléctrica y de Computación (FEEC), Universidad de Campinas (UNICAMP), 175 p., Campinas-SP, Brasil, 1998.

Este trabajo trata sobre la aplicación del método directo basado en la función de energía para el análisis de la estabilidad transitoria de los sistemas eléctricos de potencia. Mediante la función de energía es posible determinar el margen de energía, un índice numérico que facilita la adopción de medidas correctivas y acciones de control para mejorar la estabilidad transitoria y la seguridad dinámica de los sistemas de potencia. Se estudió la energía potencial en las proximidades del tiempo crítico de eliminación de una contingencia, observándose un comportamiento aún no descrito en la literatura. Como resultado de ese estudio se sugiere un criterio para identificar el tiempo crítico a partir de simulación en el dominio del tiempo. En este trabajo se propone además una nueva metodología para el cálculo del punto de equilibrio inestable de control, que se mostró más eficiente y confiable que la metodología actual. La metodología propuesta incorpora un nuevo algoritmo de detección del punto de salida y dos nuevos algoritmos para el cálculo de puntos de equilibrio. Se presentan resultados de pruebas realizadas en sistemas de pequeña y gran escala, operando bajo estrés, confirmando la validez de las propuestas formuladas en este trabajo de investigación.

Palabras Claves:

Punto de Equilibrio Inestable, Función de Energía Transitoria, Estabilidad Transitoria, Seguridad Dinámica, Sistemas Eléctricos de Potencia.

Índice

Resumo	iii
Abstract	iv
Resumen	v
1 Introdução	1
2 Métodos de Análise da Estabilidade Transitória	6
2.1 Introdução	6
2.2 Classificação Geral dos Métodos	7
2.2.1 Método Indireto	8
2.2.2 Métodos Diretos	12
2.2.3 Métodos Híbridos	16
3 A Função de Energia Transitória	18
3.1 Introdução	18
3.2 Modelagem Básica	19
3.3 Modelo relativo ao COI	22
3.4 Derivação da Função de Energia Transitória	25
3.4.1 Função de Energia do Sistema Máquina e Barra Infinita	26
3.4.2 Função de Energia de Sistemas Multimáquina	29
3.4.3 Energia Transitória das Máquinas Individuais	33
3.5 Análise da Estabilidade Transitória usando a Função de Energia	35
3.6 Testes do Método TEF e Discussão de Resultados	43
3.7 Comportamento da Energia Transitória nas Proximidades do Tempo Crítico	54
3.8 Cálculo do Tempo Crítico Usando o Critério da Máxima Energia Potencial	60
4 A Região de Estabilidade e o Cálculo do Ponto de Equilíbrio Instável de Controle	63
4.1 Introdução	63
4.2 Caracterização Matemática dos Pontos de Equilíbrio	65
4.3 A Função de Energia e o Ponto de Equilíbrio Instável de Controle	70
4.4 Metodologia Proposta para Cálculo do Ponto de Equilíbrio Instável de Controle	88

4.5	Detecção do Ponto de Saída	90
4.6	Cálculo dos Pontos de Equilíbrio	93
4.6.1	Método Newton-Raphson Modificado	94
4.6.2	Método Newton de Segunda Ordem	96
4.6.3	Método BFGS	97
4.6.4	Método do Fluxo de Potência Newton-Raphson Esparso	98
4.6.5	Método do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido Esparso	99
4.7	Testes e Discussão de Resultados	101
4.7.1	Sistema de teste WSCC3	101
4.7.2	Sistema de teste IEEE50	104
4.7.3	Testes com Fluxo de Potência Esparso	109
5	Conclusões	114
	Referências Bibliográficas	117
	Apêndices	125
A	Dados dos Sistemas de Teste	126
A.1	Sistema WSCC3	126
A.2	Sistema WSCC4	127
A.3	Sistema ABIAD4	129
A.4	Sistema CHIANG3	130
A.5	Sistema IEEE17	131
A.6	Sistema IEEE50	131
B	Componentes das matrizes $[J]$ e $[G_k]$	133
C	O Programa Computacional “Transtef”	136
D	Cálculo de Índices de Estabilidade Transitória e Permanente Usando Redes Neurais	139
E	Processamento Paralelo e Distribuído para Análise de Estabilidade Transitória e de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica	158

Lista de Figuras

2.1	Sistema IEEE17, ângulos dos rotores para uma condição de operação estável, modo planta.	9
2.2	Sistema IEEE17, ângulos dos rotores para uma condição de operação instável, modo planta.	9
2.3	Sistema IEEE50, ângulos dos rotores para uma condição de operação estável, modo inter-área.	11
2.4	Sistema IEEE50, ângulos dos rotores para uma condição de operação instável, modo inter-área.	11
2.5	Sistema máquina e barra infinita.	13
2.6	Critério de igualdade de áreas, sistema máquina e barra infinita.	13
2.7	Oscilações e máximos locais de V_{EP}	16
3.1	Modelo clássico da máquina síncrona.	20
3.2	Modelo clássico da rede de potência reduzida aos nós internos.	20
3.3	Critério da função de energia para o sistema máquina - barra infinita.	27
3.4	Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso estável.	44
3.5	Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso instável.	44
3.6	Sistema ABIAD4 sem amortecimento. Componentes da função de energia, caso estável.	46
3.7	Sistema ABIAD4 sem amortecimento. Componentes da função de energia, caso instável.	46
3.8	Sistema IEEE50. Componentes da função de energia, sistema estável caso não-estressado.	47
3.9	Sistema IEEE50. Componentes da função de energia, sistema estável caso sob estresse.	47
3.10	Sistema WSCC4. Tempo de eliminação t_{cl} vs. Margem de energia transitória normalizada.	53
3.11	Sistema IEEE17. Tempo de eliminação t_{cl} vs. Margem de energia transitória normalizada.	53
3.12	Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso marginalmente estável.	55

3.13	Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso marginalmente instável.	55
3.14	Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso marginalmente instável mostrando “ressonância”.	56
3.15	Sistema WSCC4, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. máxima energia potencial, mostrando comportamento final quase constante de $V_{EP_{max}}$	57
3.16	Sistema WSCC4, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. máxima energia potencial, mostrando “ressonância” de $V_{EP_{max}}$	57
3.17	Sistema WSCC4, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. tempos de ocorrência da máxima energia potencial e da primeira máxima energia potencial, mostrando “ressonância”.	58
3.18	Sistema IEEE50, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. máxima energia potencial.	59
3.19	Sistema IEEE50, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. tempo de ocorrência da energia potencial máxima.	59
3.20	Sistema WSCC4. Cálculo do tempo crítico usando como critério $V_{EP_{max}} = V(\theta, \tilde{\omega})$	61
3.21	Sistema IEEE17. Cálculo aproximado do tempo crítico usando como critério $V_{EP_{max}} = V(\theta, \tilde{\omega})$	61
3.22	Sistema IEEE50, caso 1. Cálculo do tempo crítico usando como critério $V_{EP_{max}} = V(\theta, \tilde{\omega})$	62
4.1	Variedades estável e instável de um ponto de equilíbrio.	66
4.2	Região de estabilidade $A(X_s)$ e limite de estabilidade $\partial A(X_s)$ de um ponto de equilíbrio estável X_s	68
4.3	Condições de transversalidade não satisfeitas pelas variedades estável e instável dos elementos críticos x_1 e x_2 do domínio de atração do elemento estável x_s	68
4.4	Sistema WSCC3a. Superfície de energia potencial e os pontos de equilíbrio estável (SEP) e instáveis (UEP), nas coordenadas de ângulos (θ_1, θ_2)	73
4.5	Sistema WSCC3a. O total dos UEPs (12) e as curvas de nível da energia potencial, projetados nas coordenadas (θ_1, θ_2)	73
4.6	Sistema WSCC3a. Curvas de nível da superfície de energia potencial, a PEBS e as energias potenciais transitórias nos pontos de equilíbrio.	75
4.7	Sistema WSCC3a. Trajetória sob falta atravessando a variedade estável $W^s(\theta^{u3})$ no ponto de saída θ^e do limite de estabilidade de θ^{s2}	75
4.8	Sistema CHIANG3. Superfície de energia potencial, limite de estabilidade e superfície de energia constante nas coordenadas (δ_1, δ_2) ; os ângulos são dados em radianos.	77
4.9	Sistema CHIANG3. Outra projeção da superfície de energia potencial, o limite de estabilidade, e a superfície de energia constante nas coordenadas (δ_1, δ_2) ; os ângulos são dados em radianos.	77
4.10	Sistema CHIANG3. Gráfico de contorno da energia potencial, o limite de estabilidade e vários pontos de equilíbrio nas coordenadas (δ_1, δ_2)	78
4.11	Sistema CHIANG3. Região de estabilidade do SEP pós-falta e o limite de estabilidade projetadas nas coordenadas (δ_1, δ_2)	78

4.12	Sistema CHIANG3. Intersecção da região de estabilidade e o conjunto conectado da superfície de energia constante do CUEP.	80
4.13	Sistema CHIANG3. Trajetória sob falta projetada na região de estabilidade e na superfície de energia constante do CUEP.	80
4.14	Sistema CHIANG3. Trajetórias pós-falta estável e instável projetadas, região de estabilidade e superfície de energia constante de $V(X_{co})$, projetadas nas coordenadas (δ_1, δ_2)	81
4.15	Sistema CHIANG3. Região de estabilidade e superfície de energia constante correspondente a uma energia potencial menor que $V(X_{co}) = -0.3136$. Estimativa conservativa.	82
4.16	Sistema CHIANG3. Região de estabilidade e superfície de energia constante correspondente a uma energia potencial maior que $V(X_{co}) = -0.3136$. Estimativa otimista.	82
4.17	Sistema CHIANG3. Região de estabilidade e superfície de energia constante correspondente a uma energia potencial menor ($V = -1.0$) que $V(X_{co}) = -0.3136$. Aproximação conservativa da região de estabilidade.	83
4.18	Sistema CHIANG3. Região de estabilidade e superfície de energia constante correspondente a uma energia potencial ($V = -0.1$) maior que $V(X_{co}) = -0.3136$. Aproximação otimista da região de estabilidade.	83
4.19	Sistema CHIANG3e. Superfície de energia potencial e <i>closest</i> UEP de um sistema estressado.	85
4.20	Sistema CHIANG3e. Gráfico de contorno da energia potencial, o limite de estabilidade e os pontos de equilíbrio de um sistema estressado.	85
4.21	Superfície de energia potencial V_{EP} : a) caso carga leve, sistema CHIANG3; b) caso sob estresse, sistema CHIANG3e.	87
4.22	Ilustração do conceito de regiões de estabilidade para um sistema com carga leve (sistema CHIANG3) e uma situação de estresse (sistema CHIANG3e).	87
4.23	Uma visualização gráfica do método BCU no espaço de ângulos.	89
4.24	Deteção do cruzamento por zero de $\langle f, \tilde{w} \rangle$ usando interpolação linear.	92
4.25	Convergência do método Newton-Raphson durante o cálculo do CUEP, partindo do ponto de saída ($\epsilon_1 = 10^{-6}$, $\epsilon_2 = 20$).	96
4.26	Diagrama de fluxo do algoritmo Newton-Raphson esparso.	100
4.27	Sistema IEEE50, CUEP do Caso 5 calculado com os métodos BFGS e NR, θ^{ex} ou θ^{mgp} utilizados como valores de partida.	107
4.28	Sistema IEEE50, Caso 9. Perfil do UEP de controle calculado com o método NR reduzido e com os métodos esparsos FNR e FBX.	113
A.1	Diagrama unilinear e dados da rede elétrica do sistema WSCC3.	126
A.2	Diagrama unilinear e dados da rede elétrica do sistema WSCC4.	128
A.3	Diagrama unifilar e dados da rede elétrica do sistema ABIAD4.	129

Lista de Tabelas

3.1	Sistema ABIAD4 sem amortecimento, pontos de equilíbrio para um curto-circuito trifásico na barra 3 eliminado em $t_{cl} = 0.40$ s	48
3.2	Sistema WSCC4, pontos de equilíbrio para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado ao desligar um ramo 8-10* em $t^{cl} = 0.15$ s.	49
3.3	Sistema IEEE17, pontos de equilíbrio para um curto-circuito trifásico na barra 26, eliminado ao desligar a linha 25-26* em $t_{cl} = 0.15$ s.	50
3.4	Sistema IEEE50 caso base, pontos de equilíbrio para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado com desligamento da linha 6-7* em $t_{cl} = 0.1080$ s.	51
4.1	Sistema WSCC3, casos testados e SEPs pós-falta	102
4.2	Sistema WSCC3, cálculo de θ^{ex} and θ^{mgp}	102
4.3	Sistema WSCC3, cálculo do UEP de controle.	103
4.4	Sistema IEEE50, dados dos casos de teste e SEPs pós-falta	104
4.5	Sistema IEEE50, cálculo de θ^{ex} and θ^{mgp}	105
4.6	Sistema IEEE50, cálculo do UEP de controle.	106
4.7	Sistema IEEE50, Caso 9, linha 6-7* desligada em $t_{cl} = 0.1080$ s.	108
4.8	Sistema IEEE50, comparação dos tempos de CPU entre o método BCU e o método proposto.	109
4.9	Sistema IEEE50, $Pg(93) = Pg(110) = 1801.9013$ MW, linha 6-7* desligada. Componentes do ponto de equilíbrio instável $\theta^u = \theta^{s2}$ (UEP=SEP) calculado com o método FNR.	111
4.10	Sistema IEEE50, $Pg(93) = Pg(110) = 1801.9013$ MW, linha 6-7* desligada. Componentes do ponto de equilíbrio instável $\theta^u = \theta^{s2}$ (UEP=SEP) calculado com o método FBX.	112
A.1	Estado do caso base do sistema WSCC3.	127
A.2	Dados dos geradores e condição inicial do sistema WSCC3.	127
A.3	Estado do caso base do sistema WSCC4.	127
A.4	Dados dos geradores e condição inicial do sistema WSCC4.	128
A.5	Estado do caso base do sistema ABIAD4.	129
A.6	Dados dos geradores e condição inicial do sistema ABIAD4.	130
A.7	Dados das máquinas síncronas do sistema IEEE17.	132
A.8	Dados das máquinas síncronas do sistema IEEE50.	132

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de energia elétrica (SEE) abrangem na atualidade grandes áreas geográficas compostas, por exemplo, de vários estados ou países, e normalmente operam de forma interligada por razões técnicas, econômicas e com a finalidade de um melhor atendimento da crescente demanda de energia elétrica. Um dos principais objetivos do sistema elétrico é o fornecimento da energia sem interrupções e com uma adequada qualidade de serviço, ou seja, os níveis de tensão e frequência devem ser mantidos dentro de limites pré-estabelecidos tecnicamente, respeitando as normas reguladoras; além disso também devem ser levadas em conta restrições econômicas que redundam em um menor custo da eletricidade, bem como restrições ecológicas e ambientais [WOOD96, BERGE86, PAUC92].

Durante a operação dos SEE, frequentemente acontecem complexos fenômenos dinâmicos de diversas naturezas que colocam em risco sua estabilidade, comprometem sua segurança dinâmica, e reduzem sua confiabilidade. O problema da estabilidade está relacionado com a capacidade de reação do sistema diante de fortes desequilíbrios entre a geração e a demanda de energia elétrica causados por perturbações; as perturbações são mudanças súbitas nas condições de operação¹ ou nos parâmetros de operação do sistema de potência, apresentam-se de forma fortuita e poucas vezes correspondem a eventos para manutenção preventiva [ARRI83, ANDE77, HEYD86]. Essas perturbações podem ser pequenas ou grandes; são consideradas pequenas quando a análise do problema justifica a linearização das equações que descrevem a dinâmica do sistema; se a linearização não pode ser aplicada a perturbação é considerada grande. Exemplos de perturbações pequenas são as mudanças contínuas e aleatórias das cargas de menor importância, esse tipo de perturbação não muda a topologia original do sistema que continuará operando no regime permanente (esta condição de operação pode ser similar ou próxima da condição inicial) logo após a ocorrência da perturbação, exceto nas situações em que no período de pré-perturbação o sistema esteja operando nas proximidades do seu limite de estabilidade per-

¹Através deste trabalho serão utilizados indistintamente os termos *condição de operação*, *ponto de operação* ou *estado de operação*, para designar o conjunto dos valores das grandezas que descrevem o *estado* de um sistema de potência.

manente; nesse caso uma pequena perturbação pode comprometer a *estabilidade permanente* do sistema [IEEE82, PAUC91a, HEYD86, FOUA92]. O problema da estabilidade permanente ou estabilidade a pequena perturbação não é tratado neste trabalho.

São consideradas perturbações grandes as faltas do tipo curto-circuito, os desligamentos de geradores, desligamentos de cargas importantes, etc., que de alguma maneira causam uma mudança da topologia do sistema pelo menos durante o tempo em que a perturbação está presente; a ocorrência dessas perturbações é imprevisível. As perturbações de grande porte podem comprometer a *estabilidade transitória* do sistema, ou seja, o sincronismo em que estão operando as máquinas síncronas do sistema elétrico pode ser perdido, se não forem tomadas ações específicas no menor tempo possível; uma primeira ação é efetuada pelos dispositivos de proteção que se encarregam de acionar os disjuntores com o objetivo de eliminar os curto-circuitos mediante a desconexão da linha com falta, que geralmente acontece em alguns poucos ciclos (alguns décimos de segundo). Depende muito da rapidez com que uma falta é eliminada para que o sistema pós-contingência possa recuperar-se convenientemente a fim de manter a sua estabilidade transitória. [ARRI83, PAUC91b, ANDE77]. O período transitório de interesse no problema da estabilidade transitória compreende o tempo entre o início de uma grande perturbação e o restabelecimento da operação síncrona em um novo ponto de operação aceitável no regime permanente. O período transitório abrange o período em que se verificam os fenômenos eletromecânicos, tipicamente de 1 a 5 segundos.

Tanto do ponto de vista dos produtores de energia elétrica quanto dos usuários finais, os aspectos de custo e qualidade de serviço da energia elétrica são fundamentais. Uma interrupção do serviço, por exemplo um blecaute, constitui um evento prejudicial para os interesses do binômio produtor-consumidor, pois quase sempre causa grandes perdas econômicas para ambos; se para uma contingência um sistema resulta instável, então aumenta o risco de interrupção do serviço. As empresas de geração e transmissão da energia elétrica procuram evitar a interrupção do serviço através da instalação de modernos centros de controle, que realizam diversas funções de controle como o monitoramento do sistema, fluxo de potência *on-line*, estimação de estado, controle automático da geração, análise de segurança estática e dinâmica, entre outras [PAUC97, WOOD96].

A análise de segurança dinâmica cria a necessidade de se efetuar milhares de estudos de estabilidade transitória com finalidades preventivas a fim de conseguir uma operação segura e com isso garantir o cumprimento das metas de confiabilidade e qualidade requeridas. Por essa razão uma das funções que paulatinamente vem sendo adotada nos centros de controle mais desenvolvidos é a análise da segurança dinâmica *on-line*, que tem como ferramenta básica a análise de estabilidade transitória [BALU92, CHIA95b, PAUC97].

O problema da estabilidade transitória tem a ver com o estudo da dinâmica do sistema de potência e consiste em avaliar se um sistema, que opera inicialmente no regime permanente, vai ser capaz de voltar a um ponto de operação aceitável no regime permanente logo após uma grande perturbação. Caso seja detectada uma eventual instabilidade e não seja tomada nenhuma providência, o sistema pode entrar em colapso se tal contingência ocorrer. O objetivo da função

de controle da estabilidade transitória de um centro de controle consiste na rápida determinação da estabilidade do sistema como consequência de uma perturbação. É preciso ter presente que os estudos de estabilidade transitória são complexos e difíceis porque os sistemas a serem analisados na prática são de grande porte, significando uma enorme quantidade de cenários e condições a serem estudados. [PAUC97, PAVE94, FOUA92, PAUC92].

A maioria dos programas computacionais existentes para a determinação da estabilidade transitória dos sistemas elétricos, utilizam metodologia no domínio do tempo que, embora propiciem modelagem mais realista, consomem muito tempo de cálculo e nem sempre viabilizam análises rápidas com a finalidade de procurar ações preventivas ou remediais on-line. A utilização desses programas convencionais é geralmente adequada às atividades relacionadas com o planejamento e operação realizados *off-line* [PAI 89, ARRI83, PAUC97, HEYD86]. A necessidade dos centros de controle de contar com ferramentas computacionais para a determinação on-line da estabilidade transitória fez com que, durante as últimas décadas, a pesquisa esteja principalmente voltada para os métodos diretos de estudo da estabilidade transitória. Os métodos diretos baseados na análise da função da energia transitória (TEF por *Transient Energy Function*), representam potencialmente a melhor ferramenta para implementar a função de estabilidade transitória on-line nos centros de controle. As funções de energia transitória dos sistemas elétricos de potência apresentam diversas propriedades semelhantes às funções de Lyapunov, assim como algumas vantagens de ordem prática, que as tornam particularmente eficientes para estudar a estabilidade transitória na forma direta; qualitativamente informam sobre a estabilidade ou instabilidade do sistema sem interpretação humana; e quantitativamente fornecem uma margem de energia numérica que indica quão longe ou perto do limite de estabilidade se encontra o sistema pós-contingência. [PAI 89, FOUA92, PAVE94, KUND94].

Este trabalho trata da aplicação do método da função de energia transitória para a determinação da estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica. Desde que um SEE é um bom exemplo de um sistema dinâmico não-linear real [CHIA87], a maioria dos conceitos e argumentos apresentados através do trabalho serão focalizados utilizando a teoria matemática dos sistemas dinâmicos não-lineares [GUCK83, ARRO90], conjuntamente com os princípios físicos relacionados aos sistemas elétricos.

A análise direta da estabilidade usando TEF possui atualmente fundamentos teóricos bem estabelecidos [CHIA95a, CHIA87, VARA85], embora alguns aspectos ainda estejam em discussão [LLAM95, CHIA96b]. Entretanto, no aspecto computacional, ou seja, na aplicabilidade prática do método, várias indagações, dúvidas, omissões e resultados incongruentes apresentados na literatura permitem questionar sua eficiência e confiabilidade no caso de sistemas reais com razoável número de máquinas e condições severas de operação [TREI96]. Diante disso, a motivação geral deste trabalho tem duas faces: compreender mais claramente o comportamento dinâmico de um SEE operando em condições extremas sob falta e melhorar a eficiência computacional dos métodos diretos baseados na função de energia de modo a aumentar seu grau de aplicabilidade na análise on-line da segurança dinâmica.

Durante a pesquisa teve-se o objetivo de desenvolver uma metodologia direta baseada na função

de energia, que seja eficiente e confiável, para o cálculo da margem de estabilidade transitória de sistemas multi-máquina, baseada no conceito de ponto de equilíbrio instável de controle exato. Consequentemente, foi necessário realizar uma cuidadosa revisão das qualidades dos métodos numéricos que implementem essa metodologia, e sobretudo uma caracterização da região de estabilidade em relação com a função de energia, durante e após a ocorrência de uma grande perturbação. A observação dessas considerações é necessária principalmente quando se têm sistemas reais que operam muito sobrecarregados, ou seja, sistemas estressados. Investigou-se o comportamento das componentes da energia transitória nas proximidades do tempo crítico, na tentativa de compreender e interpretar correctamente a sua evolução, e com a finalidade adicional de verificar as limitações dos métodos de solução dos pontos de equilíbrio, que não somente delimitam a região de estabilidade senão que definem com precisão os aspectos mais relevantes de vários dos métodos diretos TEF.

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo que no primeiro deles é feita uma breve introdução sobre a sua temática.

No capítulo segundo apresenta-se uma breve descrição dos principais métodos de análise da estabilidade transitória: o método indireto de simulação no tempo; os métodos diretos tais como o método das áreas iguais, das áreas iguais estendido, funções de Lyapunov e funções de energia, métodos probabilísticos, métodos que usam algumas técnicas de inteligência artificial; e métodos híbridos que são uma mistura do método indireto com um método direto.

No capítulo terceiro é feita uma revisão detalhada do método direto da função de energia transitória, destacando-se os aspectos da modelagem matemática considerada nesta pesquisa, a dedução e a formulação da função de energia a ser utilizada, bem como o algoritmo básico do método TEF. Vários estudos de estabilidade transitória em sistemas elétricos de teste de pequeno a grande porte são apresentados, os testes foram conduzidos utilizando o programa computacional desenvolvido durante esta pesquisa. Logo após são incluídas duas seções, uma dedicada ao estudo do comportamento da energia potencial nas proximidades do tempo crítico e outra que trata da formulação de uma metodologia para o cálculo direto do tempo crítico a partir de simulação no tempo e utilizando a função de energia potencial.

No capítulo quarto apresenta-se o fundamento matemático da região de estabilidade e do ponto de equilíbrio instável de controle, utilizando a teoria de sistemas dinâmicos. Em seguida descreve-se o desenvolvimento e a formulação de uma nova metodologia para o cálculo do ponto de equilíbrio instável de controle, essa metodologia engloba dois novos algoritmos desenvolvidos para o cálculo numérico de pontos de equilíbrio. A aplicação dessa nova metodologia a sistemas de potência de teste de pequeno a grande porte, e ainda operando sob estresse, demonstram a sua eficiência e confiabilidade; a discussão dos resultados obtidos são discutidos na seção final desse capítulo.

Nas conclusões, incluídas no capítulo quinto, são citados os aportes mais relevantes do trabalho, assim como os futuros possíveis desenvolvimentos que poderiam surgir a partir desta pesquisa. A numerosa lista de referências bibliográficas, incluídas depois das conclusões, reflete o interesse

atual na problemática da estabilidade transitória.

Os apêndices contêm: os dados dos sistemas de teste usados através deste trabalho; as componentes das matrizes Jacobiana e Hessiana utilizadas para calcular os pontos de equilíbrio; uma descrição das características do programa computacional principal desenvolvido durante esta pesquisa.

Capítulo 2

Métodos de Análise da Estabilidade Transitória

2.1 Introdução

O estudo e caracterização dos fenômenos dinâmicos envolvidos durante a operação dos sistemas de energia elétrica são complexos e têm ocupado uma parte importante da engenharia de potência. Desde o início da indústria de energia elétrica percebeu-se que um dos eventos dinâmicos mais importantes era o problema da estabilidade transitória, sendo que na atualidade representa ainda uma das áreas de maior atenção por parte dos engenheiros de potência. O problema da estabilidade transitória está relacionado com o sincronismo que devem manter os geradores logo após a ocorrência de uma grande perturbação, por exemplo um curto-circuito. Se o sincronismo é mantido, então o sistema pós-contingência é considerado transitoriamente estável para essa contingência e para o ponto de operação correspondente; em caso contrário é considerado instável. Uma forma prática de estudar a estabilidade transitória consiste na simulação numérica no domínio do tempo das equações diferenciais não-lineares (deduzidas aplicando a segunda lei de Newton) que descrevem o sistema. Esse método continua sendo uma das ferramentas computacionais mais utilizadas para analisar a estabilidade transitória dos sistemas de potência multimáquina. [KUND94, PAVE94].

Durante as etapas de planejamento, operação e controle dos sistemas de energia elétrica devem ser realizados estudos da estabilidade transitória com o objetivo de detectar-se qualquer problema potencial de instabilidade. É comum que a maior parte dos estudos sejam feitos *off-line*, ou seja, são estudos dirigidos principalmente para o planejamento da expansão e da operação. A implementação da função de estabilidade transitória *on-line* nos centros de gerenciamento dos SEE pode tornar factíveis algumas ações preventivas durante a operação e controle, por exemplo, a reprogramação da geração [KUO 95], a fim de melhorar o nível de segurança dinâmica.

Na procura por metodologias alternativas às técnicas no domínio do tempo, diversos métodos têm sido propostos para a solução do problema da estabilidade transitória. Dentre eles, os métodos diretos baseados nas funções de Lyapunov e nas funções de energia são aqueles que têm possibilitado as melhores soluções quando aplicados a sistemas de potência práticos e reais. Porém é necessário alertar que os métodos do tipo funções de energia (inclusive as funções de Lyapunov) ainda continuam sendo motivo de pesquisa na tentativa de melhorá-los em termos de eficiência, rapidez e robustez [LLAM95, EJE96, TREI96, SAHA97].

Na próxima seção será apresentada uma breve descrição dos principais métodos de estudo da estabilidade transitória e serão incluídos, a título de revisão, alguns exemplos de aplicação do método de simulação no domínio do tempo. No Apêndice D apresenta-se um exemplo de aplicação de redes neurais artificiais para estimar índices de estabilidade transitória. O método direto da função de energia transitória será detalhado nos próximos capítulos.

2.2 Classificação Geral dos Métodos

A operação dos sistemas de energia elétrica no regime permanente pressupõe que os ângulos dos rotores das máquinas síncronas do SEE pré-falta estão girando em sincronismo. Nessas condições e se, em um certo instante, acontecer uma contingência capaz de originar uma grande perturbação, a estabilidade transitória do sistema é definida pela capacidade do sistema pós-contingência de permanecer em sincronismo. O sistema será declarado instável se o seu sincronismo não puder ser mantido. Os períodos de tempo envolvidos no estudo da estabilidade transitória são tipicamente de alguns segundos após a contingência, em que estima-se que os fenômenos eletromagnéticos já terminaram e apenas os fenômenos eletromecânicos são de interesse [ARRI83, FOUA92].

Um sistema de energia elétrica é um sistema dinâmico não-linear e a sua dinâmica pode ser representada por um conjunto acoplado de equações diferenciais ordinárias não-lineares de primeira ordem, formuladas a partir da aplicação da segunda lei de Newton. Segundo essa abordagem a estabilidade transitória de um SEE pode ser explorada mediante o acompanhamento da sua evolução no tempo, bem como pela avaliação no espaço de estados do seu movimento no domínio de atração do ponto de equilíbrio de regime permanente. O primeiro é chamado método de simulação no domínio do tempo e consiste em um *método indireto*, no sentido que o diagnóstico da estabilidade é obtida a partir das curvas de oscilação dos rotores através de uma interpretação humana ou de um sistema especialista. O segundo pertence à classe dos *métodos diretos*, no sentido que a estabilidade é determinada sem resolver as equações diferenciais do sistema no período pós-falta. Os *métodos híbridos* utilizam uma mistura dos métodos indireto e direto(s). Os métodos que usam técnicas de inteligência artificial também podem ser classificados como diretos. A seguir será dada uma descrição introdutória do método indireto e dos principais métodos diretos mas sem entrar nos detalhes da modelagem, que será mostrada posteriormente.

2.2.1 Método Indireto

Tradicionalmente os programas computacionais que usam esse método apresentam uma grande flexibilidade para adotar modelos completos das máquinas síncronas, dos seus controladores, dos dispositivos FACTS, etc. A esparsidade da matriz de admitância (Y_{bus}) que descreve a rede elétrica, pode ser preservada possibilitando simulações com moderado uso de espaço de memória; porém, independentemente da matriz Y_{bus} ser reduzida aos nós internos ou não, o esforço computacional para resolver o problema dessa forma é intenso para sistemas de grandes dimensões. A idéia básica do método consiste em resolver as equações diferenciais mediante integração numérica passo a passo, e analisar a evolução no tempo dos ângulos dos rotores dos geradores, tais ângulos são componentes das *trajetórias* do SEE que serão descritas convenientemente no capítulo 4. É usual que esses ângulos tenham como referência o ângulo da máquina com maior inércia ou o ângulo do centro de inércia do sistema (COI por *Center of Inertia*). Se as oscilações dessas curvas não aumentarem indefinidamente o SEE é considerado estável; em caso contrário será declarado instável. Esse é o motivo pelo qual a estabilidade transitória também é conhecida como *estabilidade angular*.

Em seguida serão mostrados dois exemplos do método indireto utilizando o sistema de teste IEEE17 de 17 geradores, 162 barras e 284 ramos (ver Anexo [A.5]); esse sistema apresenta um interessante e complexo comportamento dinâmico. Uma perturbação é gerada pela simulação de um curto-circuito trifásico na barra <RAUN 3 345> (barra # 26), sendo a falta eliminada pelo desligamento da linha existente entre as barras 26-25. Por facilidade de visualização somente serão mostradas as curvas dos ângulos de seis dos dezessete geradores, exatamente aqueles mais severamente perturbados pelo curto-circuito. O método trapezoidal implícito foi utilizado para a integração das equações diferenciais, através de um programa desenvolvido pelo autor para servir como referência em estudos de estabilidade transitória.

Os passos de tempo utilizados nas simulações foram 0.020 s para simular o período sob falta e 0.025 s durante o período pós-falta. Tempos de simulação maiores afetam a precisão (e qualidade das curvas de oscilação) porém a determinação da estabilidade de primeira oscilação continua válida ainda com passos de integração da ordem de 0.25 s, por exemplo. Conforme aquilo confirmou-se que o método trapezoidal implícito pode utilizar passos de integração grandes sem comprometer a sua performance para estimar a estabilidade transitória de primeira oscilação.

Em uma primeira simulação a falta foi eliminada em 0.19 s (ver Figura 2.1); observa-se que este caso corresponde a um sistema estável (criticamente estável) porque as oscilações dos ângulos (nos exemplos deste capítulo a referência angular é o ângulo do centro de inércia) são amortecidas. O gerador No. 6 é um dos mais severamente perturbados e não somente apresenta a maior magnitude de oscilação senão também é o gerador mais avançado e um dos primeiros a perder a estabilidade. O gerador No. 13 também apresenta uma grande oscilação com tendência à instabilidade. No segundo caso o tempo de eliminação da falta foi 0.20 s (ver Figura 2.2) e o sistema claramente resultou instável (criticamente instável). O gerador No. 6 se instabiliza na segunda oscilação, apesar de ser o gerador que apresentou o ângulo mais avançado durante a simulação do caso criticamente estável.

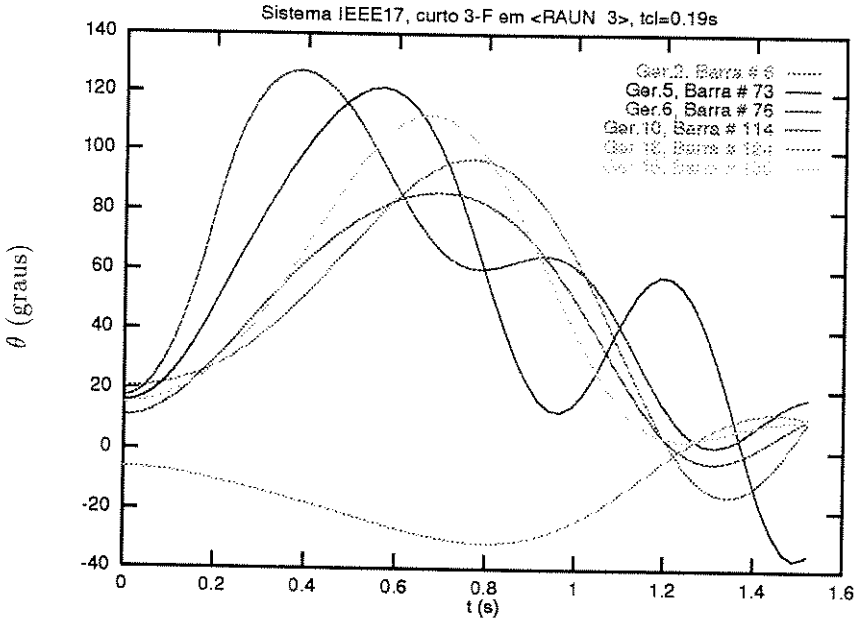


Figura 2.1: Sistema IEEE17, ângulos dos rotores para uma condição de operação estável, modo planta.

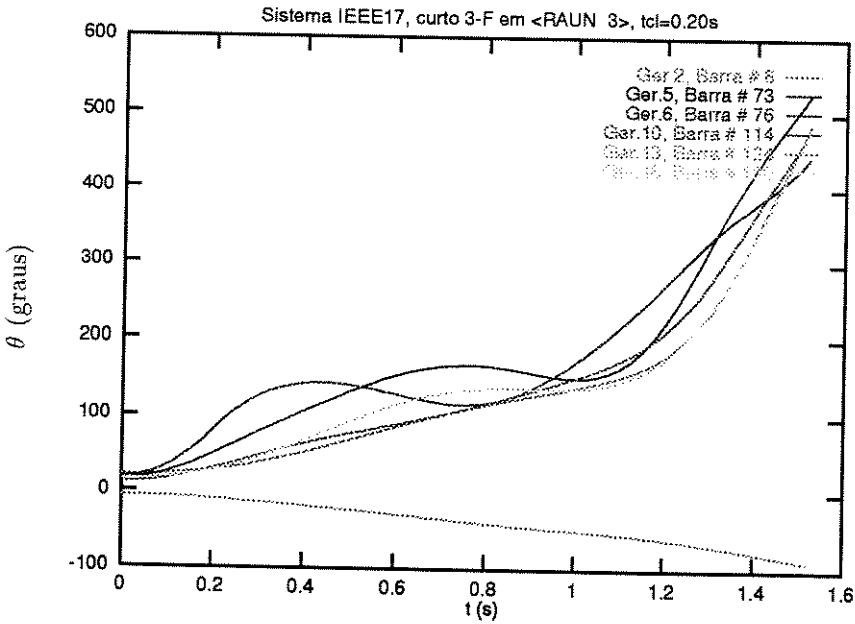


Figura 2.2: Sistema IEEE17, ângulos dos rotores para uma condição de operação instável, modo planta.

Analisando os tempos de eliminação da falta nas duas simulações, o tempo crítico de eliminação t_{cr} pode ser estimado como $0.19s < t_{cr} < 0.20s$. Por outro lado, sabe-se que os tempos envolvidos para simular o sistema pós-falta são significativos e representam a maior desvantagem dos métodos no domínio do tempo; nos casos apresentados o período pós-falta significou mais de 85 % do tempo total de simulação. Uma opção para acelerar o processo de simulação é utilizar passos de integração grandes, porém isso pode degradar a precisão desejada.

De acordo com a localização e intensidade da perturbação, os SEE apresentam diversos modos de oscilação, por exemplo os modos inerciais, que estão controlados pelas inércias das máquinas e os torques de sincronização, ou os modos originados pelos controladores (regulador automático de tensão, equipamento para o controle automático da geração, estabilizador de potência, etc.), entre outros, pode-se ainda ter uma interação entre os diversos modos de oscilação excitados [FOUA92, FOUA88, PAUC89].

Na estabilidade (ou instabilidade) do modo planta (chamado também de modo local), um grupo relativamente pequeno de geradores fortemente acoplados e eletricamente próximos da perturbação, são severamente perturbados e oscilam contra o resto dos geradores no sistema de potência a uma frequência de 0.8 Hz a 2.5 Hz [PAUC89, FOUA88, FOUA92, PAVE94]. As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram esse tipo de estabilidade (ou instabilidade) para o sistema IEEE17.

Na oscilação do modo inter-área, várias máquinas em uma parte do sistema (e não necessariamente fortemente acoplados eletricamente) oscilam contra máquinas em outras partes do sistema, com frequências típicas de 0.1 Hz a 0.7 Hz [PAUC89, FOUA88, FOUA92, PAVE94]. Um sistema de grande porte, o sistema IEEE50 de 50 geradores, 145 barras e 453 ramos (ver Anexo [A.6]), será utilizado para mostrar a estabilidade (ou instabilidade) de modo inter-área; para isso o caso base é modificado fazendo $Pg(93) = Pg(110) = 1580$ MW, a fim de simular uma condição sob estresse; somente as potências das barras 104 e 111 são diferentes para os casos estável e instável. As Figuras 2.3 e 2.4 correspondem a simulações da ocorrência de um curto-circuito trifásico na barra <NAN 17A 500> (barra # 7) eliminado em 0.1080 seg. mediante o desligamento da linha 6-7.

A grande vantagem dos métodos no domínio do tempo é a possibilidade de usar modelos bem detalhados, mas essa vantagem pode ser insuficiente quando é requerida mais informação, além de um simples *sim* ou *não* sobre a estabilidade transitória. Assim por exemplo, a síntese dos tempos críticos é uma tarefa que requer várias simulações. Por outro lado, a seleção de contingências críticas dentro de um esquema de análise da segurança dinâmica *on-line* pode inviabilizar a aplicação do método indireto pelo enorme tempo computacional envolvido; para contornar esses problemas o uso de métodos alternativos diretos tem sido visto como uma solução adequada. [PAI 89, FOUA92, PAVE94]; além disso, torna-se muito mais útil dispor-se de informação sobre margens relativas de estabilidade e instabilidade, o que requer um processamento adicional pós-simulação [FOUA86, MARI90].

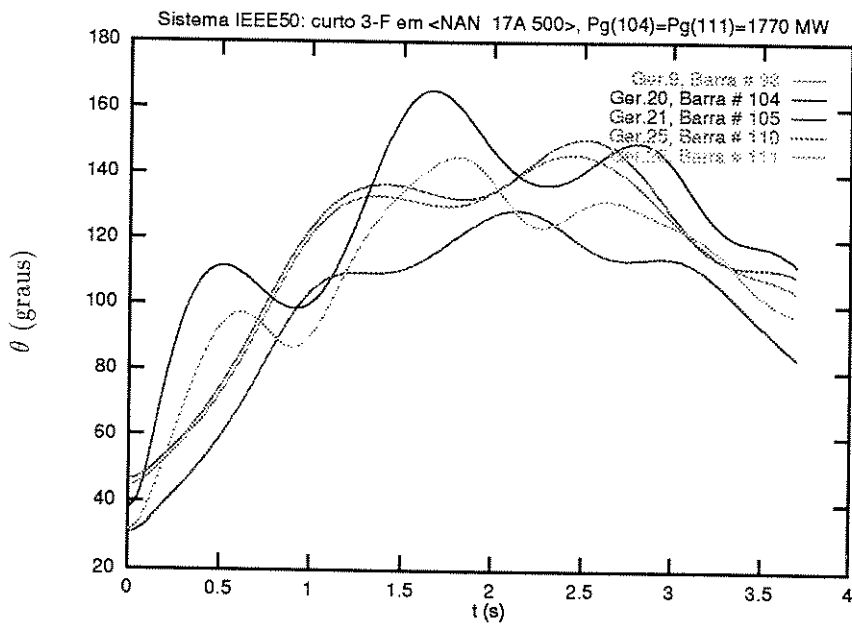


Figura 2.3: Sistema IEEE50, ângulos dos rotores para uma condição de operação estável, modo inter-área.

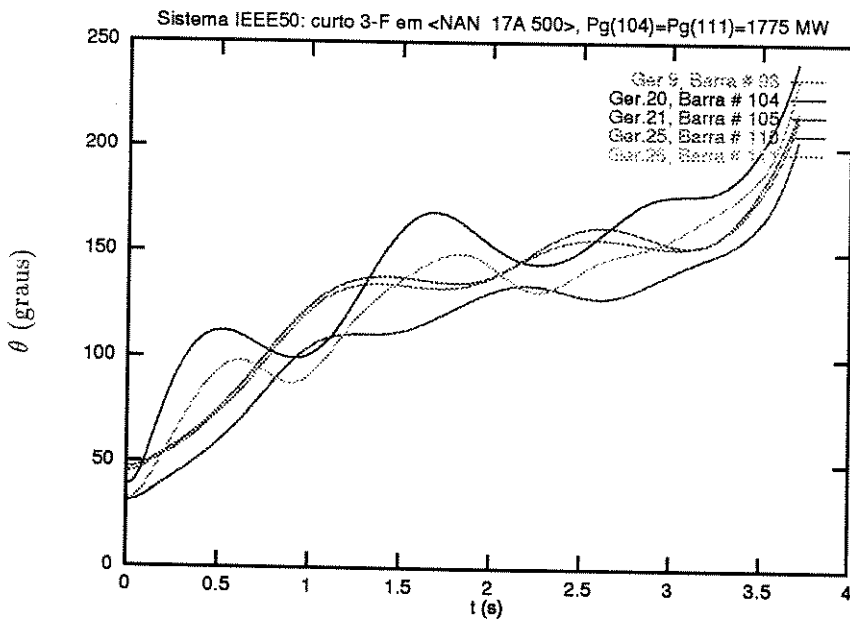


Figura 2.4: Sistema IEEE50, ângulos dos rotores para uma condição de operação instável, modo inter-área.

2.2.2 Métodos Diretos

Os métodos diretos de análise da estabilidade transitória determinam a estabilidade do sistema sem necessidade de simular pelo menos a demorada etapa pós-falta. Recebem o nome de métodos *diretos* porque normalmente utilizam algum índice que obtém diretamente a estabilidade transitória. Na literatura é usual associar o termo *método direto* aos métodos baseados em funções de Lyapunov e em funções de energia [FOUA92, PAVE94, HEYD86]. Neste trabalho considera-se que os métodos que utilizam um índice quantitativo para analisar a estabilidade transitória são classificados como métodos diretos. Os métodos de estabilidade que usam conceitos de inteligência artificial também estão incluídos nesta classe de métodos. Em geral, as vantagens dos métodos diretos são as correspondentes desvantagens dos métodos indiretos e vice-versa.

CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS

O primeiro método direto de análise da estabilidade é o clássico critério de igualdade de áreas [KIMB48, ANDE77]. Uma limitação desse método é que ele somente pode ser aplicado a sistemas de duas máquinas ou sistemas de uma máquina e barra infinita (MBI), como o sistema representado na Figura 2.5. O método é apresentado graficamente na Figura 2.6, referente ao sistema da Figura 2.5, em que o critério para estabilidade é que a área de energia acelerante tem de ser menor que a área de energia desacelerante, $A_{ace} < A_{dec}$.

O tempo crítico e a margem de estabilidade podem ser avaliadas analiticamente. O cálculo do tempo crítico t_{cr} pode ser feito em dois passos:

Passo 1. Resolver a equação algébrica não-linear que resulta de igualar $A_{ace}(\delta_c) = A_{dec}(\delta_c)$, em que a variável é o ângulo crítico δ_c ; SEP é o ponto de equilíbrio estável pós-falta.

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} \{Pm - Pe^f(\delta)\} d\delta = \int_{\delta_c}^{\pi-SEP} \{Pm - Pe^{pf}(\delta)\} d\delta \quad (2.1)$$

Passo 2. Resolver a equação (2.2), obtida mediante uma série de Taylor truncada em três termos e que relaciona o ângulo com o tempo [XUE89], a fim de calcular analiticamente t_{cr} ,

$$\delta_c = \delta_0 + k_1^{-1} k_2^{-2} \gamma \frac{t_{cr}^2}{2} + k_1^{-1} k_2^{-4} \ddot{\gamma} \frac{t_{cr}^4}{24} \quad (2.2)$$

em que:

k_1, k_2 = fatores de correção de ângulo e de tempo, respectivamente.

$\gamma \equiv \ddot{\delta}$ = aceleração do sistema máquina e barra infinita no instante $t = 0^+$.

Para determinar a margem de energia se avalia a energia do sistema no ponto de equilíbrio instável (UEP) e no ponto de eliminação da falta (δ_{CL}), sendo a diferença o valor do índice de estabilidade. Se a margem de energia é maior que zero o sistema é considerado estável, caso contrário será instável.

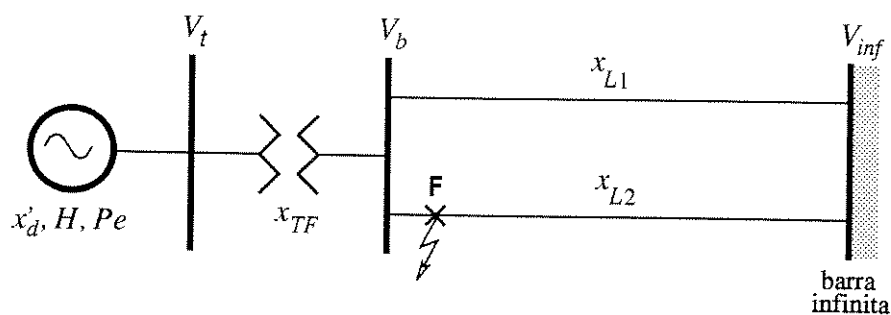


Figura 2.5: Sistema máquina e barra infinita.

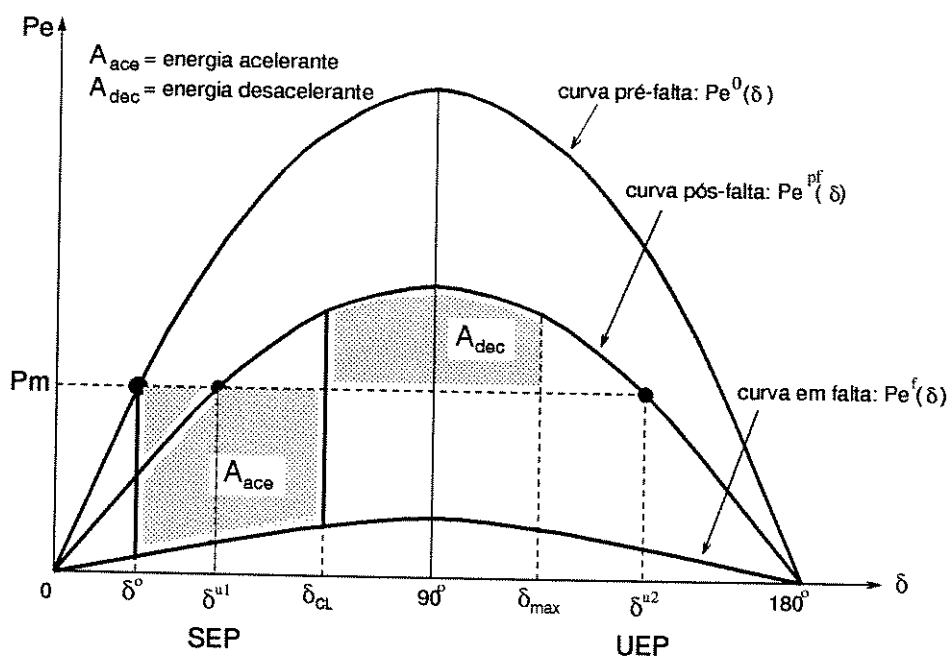


Figura 2.6: Critério de igualdade de áreas, sistema máquina e barra infinita.

CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS ESTENDIDO

Mais recentemente (1986) propôs-se o método de igualdade de áreas estendido ou EEAC (*Extended Equal-Area Criterion*), em que um sistema de potência multimáquina é decomposto em dois subconjuntos, um deles contendo o grupo das máquinas críticas e outro grupo composto das máquinas restantes. Os dois grupos são transformados, mediante decomposição-agregação, a um equivalente de duas máquinas modeladas em relação aos seus correspondentes centros de inércia parciais. Em seguida, as duas máquinas equivalentes são reduzidas a um sistema de uma

máquina - barra infinita. A aplicação do critério convencional de igualdade de áreas juntamente com uma expansão de série de Taylor modificado geram expressões algébricas simples de serem resolvidas a fim de determinar o tempo crítico de eliminação e a margem de estabilidade. A Figura 2.6 e as equações (2.1) e (2.2) continuam válidas. Existem duas versões para o método EEAC, a estática e a dinâmica. A diferença é que a dinâmica realiza uma atualização (*refreshing*) dos parâmetros do equivalente máquina - barra infinita das configurações durante os períodos em falta e pós-falta, usando série de Taylor juntamente com coeficientes de sensibilidade. Os métodos EEAC e de igualdade de áreas podem ser considerados dentro da classe de métodos de funções de energia pelo menos para o sistema MBI ou MBI multimáquina. [PAVE94, XUE89].

FUNÇÕES DE LYAPUNOV E FUNÇÕES DE ENERGIA

Os métodos diretos baseados nas funções de Lyapunov e nas funções de energia utilizam a teoria dos sistemas dinâmicos autônomos descritos pela equação diferencial do movimento perturbado,

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.3)$$

em que x é a trajetória do sistema.

A idéia básica desses métodos consiste em definir uma função escalar $V(x)$ em uma vizinhança Ω da origem do espaço vetorial. A função $V(\cdot)$ é uma função de Lyapunov se $V(x)$ é definida positiva e $\dot{V}(x)$ é definida negativa; então a origem é assintoticamente estável. Por sua vez $V(\cdot)$ é uma função de energia se $\dot{V}(x) \leq 0$, e tanto a trajetória x como a função de energia $V(\cdot)$ são limitadas em valor. A função de energia não é uma função de Lyapunov. Infelizmente não há uma metodologia geral para construir uma função de Lyapunov (ou de energia) para sistemas dinâmicos quaisquer; por isso para sistemas de potência têm sido formuladas funções aproximadas ou válidas sob certas condições específicas. Esse é um dos motivos pelo qual os métodos de Lyapunov e da função de energia somente podem fornecer uma estimativa (aproximada) do domínio de estabilidade. [PAI 89, FOUA92, CHIA95a].

O tempo crítico t_{cr} é determinado a partir da integração numérica das equações diferenciais e corresponde ao instante de tempo em que a trajetória projetada no espaço de estados atinge o limite do domínio de estabilidade. O valor crítico da função $V(\cdot)$ é avaliada em t_{cr} . Para calcular o índice (ou margem) de estabilidade transitória (IET) tem-se que avaliar a função $V(\cdot)$ no instante t_{cl} de eliminação da perturbação e obter a diferença:

$$IET = V_{cr} - V_{cl} \quad (2.4)$$

A aplicabilidade e precisão desses métodos depende de : a) a qualidade da função $V(\cdot)$ utilizada; b) a qualidade do domínio de estabilidade estimado; c) a robustez e rapidez dos métodos numéricos que permitem a estimativa do domínio de estabilidade. Os métodos de Lyapunov e da função de energia não realizam a simulação do sistema durante o período pós-falta, exatamente a etapa computacionalmente mais intensa do método de simulação no tempo.

No presente trabalho de pesquisa é utilizado o método direto da função de energia porque apresenta as seguintes vantagens: é aplicável a sistemas de potência de tamanho prático, é menos conservativo que as funções de Lyapunov, e possibilita uma compreensão física do problema.

MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

Esses métodos usam funções de probabilidade da estabilidade ou da segurança do sistema. Assim, por exemplo, a “probabilidade de estabilidade” é um índice definido como a probabilidade de que uma falta seja eliminada dentro do tempo crítico a fim de manter a estabilidade. Geralmente um grande número de faltas são consideradas em diferentes localizações e com diferentes esquemas de eliminação de uma ou sequência de contingências. Consequentemente os cálculos para obter resultados estatisticamente satisfatórios ou para determinar a distribuição de probabilidade demandam muito esforço computacional. Uma combinação com os métodos de reconhecimento de padrões parece ser uma boa alternativa para aplicações *on-line* da estabilidade transitória. [BILL81, ANDE83].

MÉTODOS BASEADOS EM TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Alguns métodos de inteligência artificial têm sido aplicados recentemente no estudo e análise da estabilidade transitória:

- *Redes neurais artificiais*

Na última década as redes neurais artificiais têm sido aplicadas para o cálculo de margens de energia, de tempos críticos e para realizar análise de contingências. O método consiste em treinar uma rede neural para que ela aprenda e generalize o comportamento do sistema diante de perturbações diferentes daquelas que foram usadas durante o treinamento [SOBA89, MANS97]. Uma aplicação dessa técnica foi realizada pelo autor e está descrita em [PAUC96].

- *Árvore de decisão*

Esse método vem a ser uma evolução do método de reconhecimento de padrões (*pattern recognition*) cujo fundamento é considerar que há algumas características do SEE que são comuns àqueles estados de pré-perturbação que correspondem a modos instáveis, além de outras características que são comuns a todos os estados. O método basicamente utiliza informação adquirida em uma etapa prévia em modo *off-line*, com o objetivo de inferir o estado do sistema de potência. A forma como essa informação *off-line* é comprimida, organizada e extraída tem como fundamento a teoria da informação. [PAVE94].

Os métodos de estabilidade transitória apresentados não constituem uma lista exaustiva dos métodos existentes. Por outro lado, a combinação de métodos é possível, gerando vários outros métodos chamados híbridos tais como os propostos em [FONS85, LEMM89, MARI90]. Além disso, a utilização de *processamento paralelo e distribuído* pode ser aplicado com sucesso aos métodos de simulação no tempo e aos métodos baseados na função de energia na tentativa de diminuir os tempos de processamento.

2.2.3 Métodos Híbridos

Esse tipo de método é uma combinação do método no domínio do tempo e do método da função de energia. Um método híbrido foi proposto em [MARI90] que é relativamente eficiente para determinar a margem de energia; porém para calcular o tempo crítico demanda muito esforço computacional. O procedimento algorítmico consiste nos seguintes passos, reproduzidos aqui para ilustrar a filosofia dos métodos híbridos:

- Passo 1.* Realizar a simulação no tempo do sistema em falta até determinar a trajetória no instante de eliminação de falta;
- Passo 2.* Calcular o ponto de equilíbrio estável pré-falta
- Passo 3.* Continuar com a simulação da trajetória, do sistema pós-falta, até a detecção do ponto de cruzamento da superfície limite da energia potencial (ponto de máximo local da energia potencial);
- Passo 4.* Se é detectado o cruzamento do limite de estabilidade terminar com a simulação, declarar o sistema como instável e calcular a margem de energia como sendo o negativo da energia cinética corrigida;
- Passo 5.* Se não foi detectado um máximo local da energia potencial, voltar ao Passo 3; caso contrário, procurar pelo final da primeira oscilação analisando os máximos locais da energia potencial (ver Figura 2.7). Calcular a energia potencial crítica $V_{EP}^{cr(i)}$ mediante uma busca linear na direção da linha que une o SEP com o atual vetor de ângulos; definir $\Delta V_{EP}^i = V_{EP}^i - V_{EP}^{cr(i)}$. Se $\Delta V_{EP}^k > 10 \Delta V_{EP}^{min}$ (na Figura 2.7: $\Delta V_{EP}^k \equiv \Delta V_{EP}^{max}$), então parar e declarar o sistema estável, sendo a margem de energia ΔV_{EP}^{min} ; caso contrário voltar ao Passo 3.

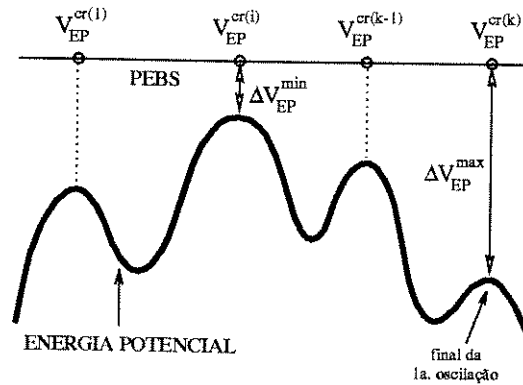


Figura 2.7: Oscilações e máximos locais de V_{EP} .

Outro método híbrido é descrito em [FONS85], em que se faz duas estimativas da energia crítica, uma otimista e outra pessimista, e sucessivamente realizam-se simulações no tempo, de forma *iterativa*, a fim de diminuir a faixa inicial. Para reduzir o esforço computacional, as trajetórias são calculadas mediante o uso de séries de Taylor, cujos coeficientes são atualizados regularmente usando intervalos de tempo da ordem de 0.10 s. Esse método permite o cálculo da margem de energia e do tempo crítico.

Capítulo 3

A Função de Energia Transitória

3.1 Introdução

O método direto de análise da estabilidade transitória baseado na função de energia transitória (TEF por *Transient Energy Function*) tem seu ponto de partida no método das áreas iguais, que é considerado um método de energia. As primeiras pesquisas para analisar a estabilidade transitória utilizando critérios de energia foram realizadas na ex-União Soviética entre os anos 30 e 40, onde Gorev por exemplo formula critérios de energia para analisar a estabilidade; no lado ocidental Magnusson deriva uma função de energia potencial usando como referência o ponto de equilíbrio pós-transitório [MAGN47], posteriormente Aylett formula as equações do sistema com base nos movimentos intermáquinas e desenvolve uma expressão para a integral de energia [AYLE58]. Na década de 70, Távora e Smith analisam a energia transitória e as condições de equilíbrio na referência do centro de inércia [TAVO72a, TAVO72b, TAVO72c]. Nos anos 60 começam a serem formuladas funções de Lyapunov para analisar a estabilidade aplicando o segundo método de Lyapunov, que embora apresentando resultados conservadores, muito influenciaram e facilitaram o desenvolvimento de conceitos fundamentais como a formulação do centro de inércia, o conceito de ponto de equilíbrio instável mais próximo da trajetória do sistema, a aproximação linear dos termos dependentes da trajetória, princípio de invariância, entre outros [PAI 81, RIBB85, GUPT76, FOUA92].

Esses trabalhos pioneiros foram muito bem utilizados por Athay e outros, quando estabeleceram as bases do método da função de energia atualmente usado, nesse sentido são consideradas clássicas as referências [ATHA79a, ATHA79b] que descrevem aspectos relevantes da metodologia da função de energia tratada neste trabalho. Não obstante, os trabalhos pioneiros de Athay e outros deixaram novos problemas e continuou-se pesquisando na tentativa de melhorá-los. É assim que desde meados dos anos 80 têm sido desenvolvidas análises teóricas dos sistemas dinâmicos visando entender e melhorar os critérios heurísticos dos métodos iniciais, permitindo caracterizar adequadamente a região de estabilidade e desenvolver métodos computacionais baseados

na função de energia transitória para analisar a estabilidade de sistemas de energia elétrica [VARA85, CHIA87, CHIA95a, TREI96]. O método BCU (*boundary of stability region based controlling unstable equilibrium point*) [CHIA94] tem sido considerado como o mais adequado nas aplicações. Entretanto, na aplicação do método BCU à sistemas maiores, especialmente em condição de estresse, têm sido observados vários problemas computacionais de eficiência e confiabilidade (dificuldade de convergência).

Além disso o objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um método computacional direto TEF mais confiável e eficiente para seleção de contingências, visando aplicação em análise de segurança dinâmica *on-line*.

Este capítulo descreve primeiro os aspectos da modelagem adotada para esta pesquisa, bem como a formulação do modelo do sistema na referência do centro de inércia. Utilizando as equações de oscilação resultantes, serão derivadas as expressões da função de energia transitória e das suas componentes, assim como as equações do sistema gradiente associado às equações de oscilação do sistema completo. O procedimento geral da aplicação da função de energia transitória como um método direto de análise da estabilidade transitória será mostrado e validado com vários testes em sistemas de potência de pequeno a grande porte. Na penúltima seção serão descritos alguns resultados de simulação realizados com o objetivo de caracterizar melhor o comportamento da energia transitória e de suas componentes nas proximidades do tempo crítico. A seção final contém um algoritmo para calcular o tempo crítico usando a derivada da função de energia potencial e simulação no tempo.

3.2 Modelagem Básica

Um sistema elétrico de potência constitui um excelente exemplo de um sistema dinâmico não-linear. Os fenômenos dinâmicos eletromecânicos experimentados por um sistema elétrico de potência submetido a perturbações podem ser adequadamente caracterizados pela segunda lei de Newton, a qual estabelece que a energia acelerante *interna* de um sistema dinâmico deve-se à energia *externa* atuante sobre o sistema.

Esses fenômenos dinâmicos dos sistemas de potência podem ser captados na interação de suas máquinas síncronas com a rede elétrica, e portanto, na adequada modelagem das máquinas síncronas e da rede reside um dos aspectos mais importantes para o estudo da dinâmica do sistema. Sabe-se que os métodos TEF nada garantem além da primeira oscilação e portanto o uso do modelo clássico para modelar as máquinas síncronas é perfeitamente justificável. Contudo é preciso mencionar que a utilização de modelos mais detalhados que o modelo clássico tem sido documentado na literatura [FOUA92, CHIA95b], embora modelos completos que considerem efeitos subtransitórios ainda não tenham sido desenvolvidos. Neste trabalho as máquinas síncronas serão representadas pelo modelo clássico, que representa a máquina síncrona por uma fonte ideal de tensão E_i atrás uma reatância síncrona no eixo direto x'_{di} (ver Figura 3.1). Esse modelo tem sido utilizado desde o início da indústria elétrica e ainda é usado para estudos que

envolvem a determinação da primeira oscilação após a ocorrência de uma grande perturbação.

Seja um sistema de potência composto de n geradores e nc cargas, a matriz admitância (Y_{bus}) que representa a rede elétrica é de ordem $nb = n + nc$, sendo nb o número de barras do sistema. Se as cargas são modeladas por impedâncias constantes, tal como foi suposto neste trabalho, possibilita-se a eliminação das barras de carga e das barras terminais dos geradores.

A rede elétrica resultante (ver Figura 3.2) pode ser representada por uma matriz admitância reduzida (Y_{red}) aos nós internos dos geradores; tanto as cargas como as reatâncias transitórias no eixo direto dos geradores estão incluídas na matriz Y_{red} cuja dimensão é $n \times n$. Os elementos da matriz Y_{red} são dados genericamente por:

$$Y_{red,ij} = G_{ij} + jB_{ij},$$

sendo G_{ij} e B_{ij} as partes real e imaginária do elemento ij da matriz Y_{red} , $i, j = 1, \dots, n$.

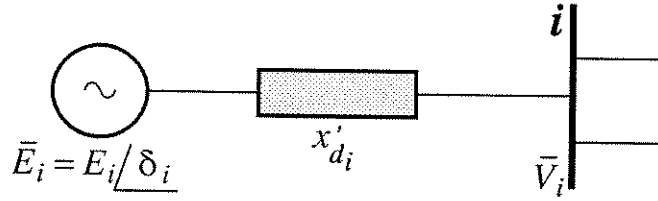


Figura 3.1: Modelo clássico da máquina síncrona.

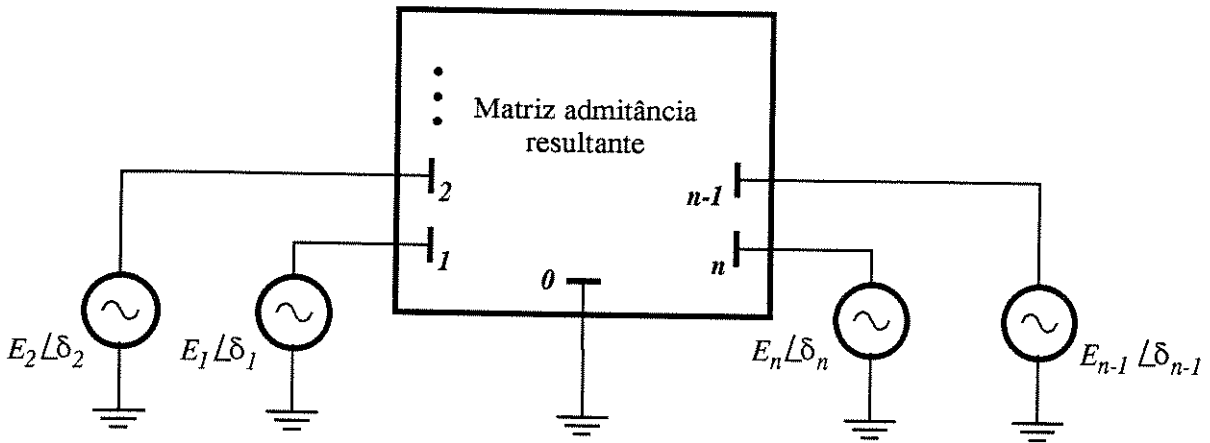


Figura 3.2: Modelo clássico da rede de potência reduzida aos nós internos.

A redução explícita da matriz Y_{bus} (aumentada) pode ser evitada preservando-se sua esparsidade e melhorando a eficiência dos estudos de estabilidade em sistemas de grande porte. Para as simulações no tempo do sistema sob falta será preservada a esparsidade da matriz admitância sem necessidade de redução aos nós internos. A matriz reduzida é normalmente utilizada durante a obtenção dos pontos de equilíbrio no método TEF. Mais tarde mostra-se como essa restrição pode ser relaxada.

A ocorrência de uma contingência implica mudanças na topologia da rede elétrica, portanto definem-se três matrizes admitância: para o período pré-perturbação, sob-perturbação e pós-perturbação, denominadas Y_{red}^0 , Y_{red}^f e Y_{red}^{pf} , respectivamente. Se a perturbação for eliminada sem alteração topológica nenhuma, a matriz admitância pré-perturbação será similar à matriz pós-perturbação, ou seja, $Y_{red}^0 = Y_{red}^{pf}$.

O vetor de correntes nodais (vetor das correntes dos geradores) é expresso pela lei de Ohm:

$$\bar{I} = Y_{red} \bar{E} \quad (3.1)$$

em que $\bar{E} = E \angle \delta$ é o vetor das tensões internas dos geradores, expressa na forma fasorial, E é o vetor das magnitudes das tensões e δ é o vetor dos ângulos das tensões internas. É suposto que, para a análise da estabilidade de primeira oscilação, as magnitudes das tensões internas são constantes.

A potência elétrica Pe_i , da i -ésima máquina, é definida em função dos ângulos δ como sendo:

$$Pe_i = \text{Re} \left\{ \bar{E}_i \bar{I}_i^* \right\} \quad (3.2)$$

$$Pe_i = \sum_{j=1}^n [C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (3.3)$$

$$Pe_i = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (3.4)$$

sendo,

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= \delta_i - \delta_j \\ C_{ij} &= E_i E_j B_{ij} \\ D_{ij} &= E_i E_j G_{ij} \end{aligned} \quad (3.5)$$

em que E_i , E_j são as magnitudes das tensões internas das máquinas i e j .

A dinâmica de um sistema elétrico de potência de n máquinas síncronas representadas pelo seu modelo clássico pode ser modelada matematicamente mediante um conjunto de n equações diferenciais ordinárias de segunda ordem, conhecidas como equações de oscilação:

$$M_i \ddot{\delta}_i = Pm_i - Pe_i - D_i \dot{\delta}_i = Pa_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3.6)$$

Para a estabilidade de primeira oscilação, a entrada de potência mecânica (Pm_i) da i -ésima máquina síncrona é considerada constante. Dependendo se o período é sob perturbação ou pós-perturbação, a potência elétrica na equação (3.6) poderá ser Pe_i^f ou Pe_i^{pf} , conforme os elementos da matriz Y_{red}^f ou Y_{red}^{pf} , respectivamente; quer dizer que para cada um desses períodos tem de ser montado um sistema de equações (3.6).

As n equações diferenciais de segunda ordem da expressão (3.6) podem ainda ser decompostas em $2n$ equações diferenciais acopladas de primeira ordem¹, cujo conjunto de equações pode ser chamado de *sistema clássico*:

$$\begin{aligned} M_i \dot{\omega}_i &= Pm_i - Pe_i - D_i \omega_i = Pa_i \\ \dot{\delta}_i &= \omega_i - \omega_R, \end{aligned} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3.7)$$

em que para a máquina i tem-se,

- δ_i = ângulo elétrico do rotor
- ω_i = velocidade angular do rotor (ω_R é velocidade síncrona nominal)
- M_i = constante de inércia do gerador ($M_i = 2H_i/\omega_R$)
- D_i = coeficiente de amortecimento
- Pm_i = entrada de potência mecânica
- Pe_i = potência elétrica
- Pa_i = potência acelerante

3.3 Modelo relativo ao COI

A representação do sistema clássico relativo ao centro de inércia COI das máquinas síncronas permite uma melhor compreensão física de seu comportamento durante o período transitório, após a ocorrência de uma contingência. A redefinição das equações de oscilação do sistema clássico relativo ao COI necessita da determinação da posição δ_0 e da velocidade ω_0 do COI.

Definindo,

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.8)$$

¹ Considerando uma das máquinas como referência, o número de equações diferenciais será $2n - 1$ para o caso de amortecimento não-uniforme, e $2n - 2$ equações para amortecimento uniforme $D_i/M_i = \text{constante}$.

Então:

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.9)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i \equiv \dot{\delta}_0 \quad (3.10)$$

$$\dot{\omega}_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i \quad (3.11)$$

em que o sub-índice “0” refere-se ao centro de inércia.

A equação da potência acelerante para o centro de inércia é derivada somando-se todas as n equações (3.7) das potências acelerantes individuais, da forma seguinte,

$$\sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i = \sum_{i=1}^n (Pm_i - Pe_i - D_i \omega_i) \quad (3.12)$$

$$M_T \dot{\omega}_0 = \sum_{i=1}^n (Pm_i - Pe_i) - \sum_{i=1}^n D_i \omega_i \quad (3.13)$$

$$M_T \dot{\omega}_0 = \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii}) - 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{ij} - \sum_{i=1}^n D_i \omega_i \quad (3.14)$$

A potência acelerante P_{COI} do centro de inércia (ou centro de ângulos) do sistema é definida por qualquer uma das seguintes equações,

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^n (Pm_i - Pe_i) \quad (3.15)$$

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii}) - 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (3.16)$$

Definindo novas variáveis relativas ao centro de inércia, tem-se que a posição, a velocidade e a aceleração angulares da máquina i são dadas respectivamente por: $\theta_i = \delta_i - \delta_0$, $\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0$, e $\dot{\tilde{\omega}}_i = \dot{\omega}_i - \dot{\omega}_0$.

É interessante verificar que as variáveis da posição e da velocidade na referência do centro de inércia conduzem à seguinte igualdade,

$$\sum_{i=1}^n M_i \theta_i = \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i = 0 \quad (3.17)$$

Agora é possível expressar as equações de oscilação (3.7) do sistema de potência em função das variáveis relativas ao COI.

Desde que o movimento dos geradores individuais é amortecido, o movimento do centro inercial também será amortecido. Para o caso $\omega_i = \text{constante} \neq 0, i = 1, \dots, n$, é assumido que o COI tem um coeficiente de amortecimento efetivo igual a D_0 dado por:

$$D_0 = \sum_{i=1}^n D_i > 0$$

Em geral, D_0 é uma função de ω_i , porém se considera que a variação de D_0 em relação a ω_i é pequena e pode ser desprezada. Então a equação (3.13) fica assim,

$$M_T \dot{\omega}_0 = P_{COI} - D_0 \omega_0 \quad (3.18)$$

em que D_0 está definido por:

$$\begin{aligned} D_0 \omega_0 &= \sum_{i=1}^n D_i \omega_i \\ D_0 \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M_T} \omega_i &= \sum_{i=1}^n D_i \omega_i \end{aligned}$$

Portanto, as equações de movimento do sistema de potência para o modelo clássico na referência do COI são determinadas substituindo-se as respectivas variáveis no COI e a equação (3.13), nas equações de oscilação (3.7),

$$\begin{aligned} M_i \ddot{\omega}_i &= P m_i - P e_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - D_i \tilde{\omega}_i - \left(D_i - \frac{M_i}{M_T} D_0 \right) \omega_0 \\ \dot{\theta}_i &= \tilde{\omega}_i \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3.19)$$

A contribuição da máquina i à aceleração do centro inercial é dada por $\frac{M_i}{M_T} P_{COI}$.

A contribuição da máquina i ao amortecimento do COI está representada por $\left(D_i - \frac{M_i}{M_T} D_0 \right) \omega_0$.

Um caso especial do sistema de equações (3.19) consiste em considerar amortecimento uniforme, ou seja, $D_i/M_i = D, i = 1, \dots, n$; nessa situação as equações de oscilação para o modelo clássico são dadas por:

$$\begin{aligned} M_i \dot{\tilde{\omega}}_i &= Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - D_i \tilde{\omega}_i \\ \dot{\theta}_i &= \tilde{\omega}_i \quad (i = 1, \dots, n) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Quando o amortecimento é desprezado, o sistema de equações do modelo clássico torna-se:

$$\begin{aligned} M_i \dot{\tilde{\omega}}_i &= Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ \dot{\theta}_i &= \tilde{\omega}_i \quad (i = 1, \dots, n) \end{aligned} \quad (3.21)$$

em que a fórmula de Pe_i pode ser função dos ângulos δ (equação 3.4) ou função dos ângulos θ pois $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j = (\delta_i - \delta_0) - (\delta_j - \delta_0) = \delta_i - \delta_j = \delta_{ij}$. Portanto,

$$Pe_i = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \sin \theta_{ij} + D_{ij} \cos \theta_{ij}] \quad (3.22)$$

3.4 Derivação da Função de Energia Transitória

Nesta seção será deduzida a função de energia proposta inicialmente em [ATHA79a] e que será chamada de função de energia transitória. Deve ser entendido que essa função de energia não é a única possível, existem funções alternativas, porém menos bem sucedidas nas aplicações práticas. As vantagens que a função de energia possui quando aplicada à análise da estabilidade transitória são: é menos conservativa que as funções de Lyapunov; possibilita uma interpretação e compreensão física do problema porque pode ser decomposta em componentes tais como a energia potencial, energia cinética e energia de dissipação, por exemplo; existem teorias bem estabelecidas que justificam a sua utilidade em termos de definição da região de estabilidade e do limite de estabilidade.

É preciso advertir que não existe uma metodologia geral para formular funções de energia válidas para sistemas de potência e que atendam às propriedades. Porém, é viável determinar funções de energia aproximadas sob certas condições, por exemplo considerando que as perdas não são muito grandes e que o sistema não é submetido a uma perturbação demasiado grande.

A seguir será apresentada a função de energia para o sistema MBI e logo após a formulação para sistemas multimáquina.

3.4.1 Função de Energia do Sistema Máquina e Barra Infinita

É interessante destacar que a função de energia transitória para o sistema máquina - barra infinita satisfaz as condições da teoria de estabilidade de Lyapunov. Por outro lado o conhecimento prévio das condições de equilíbrio permitirão uma melhor compreensão no caso multimáquina.

A Figura 3.3 ilustra graficamente o método da função de energia aplicado a um sistema de uma máquina e barra infinita similar àquele apresentado na Figura 2.5. A superfície de energia potencial (do sistema pós-falta) para o caso de um sistema MBI tem dimensão um, em consequência trata-se de uma curva. Os pontos de equilíbrio instáveis ou UEP (*Unstable Equilibrium Point*) correspondem aos máximos locais da função de energia potencial e os pontos de equilíbrio estáveis ou SEP (*Stable Equilibrium Point*) são os mínimos locais da energia potencial. Para fins de comparação, estão indicadas as áreas da energia acelerante e desacelerante, A_{ace} e A_{dec} respectivamente, usadas no critério da igualdade de áreas (ver Figura 2.6).

As equações do sistema máquina - barra infinita com o modelo clássico da máquina síncrona são dadas por:

$$\begin{aligned} M \dot{\omega} &= Pm - P_0 \sin \delta - D \omega \\ \dot{\delta} &= \omega \end{aligned} \tag{3.23}$$

em que δ é o ângulo da máquina em relação à barra infinita e D é o amortecimento.

Os pontos de equilíbrio são obtidos para $\omega = 0$, no intervalo $-\pi < \delta < \pi$, ao fazer-se igual a zero a potência acelerante $Pa = f(\delta) \equiv Pm - P_0 \sin \delta - D \omega$. Assim resultam três pontos de equilíbrio:

$\delta^s = \arcsin(Pm/P_0)$, é um ponto de equilíbrio estável;

$\delta^{u1} = \pi - \arcsin(Pm/P_0)$ e $\delta^{u2} = -\pi - \arcsin(Pm/P_0)$ são pontos de equilíbrio instáveis.

Uma função de energia pode ser deduzida da seguinte forma, lembrando que $\dot{\delta} = \omega$:

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{\delta} [M \dot{\omega} - f(\delta)] \\ \int 0 \, dt &= \int M \omega \, d\omega - \int f(\delta) \, d\delta \\ V(\delta, \omega) &= \frac{1}{2} M \omega^2 - Pm \delta - P_0 \cos \delta \end{aligned} \tag{3.24}$$

$$V(\delta, \omega) = V_{EC}(\omega) + V_{EP}(\delta) \tag{3.25}$$

$$V_{EC}(\omega) = \frac{1}{2} M \omega^2 \tag{3.26}$$

$$V_{EP}(\delta) = -Pm \delta - P_0 \cos \delta \tag{3.27}$$

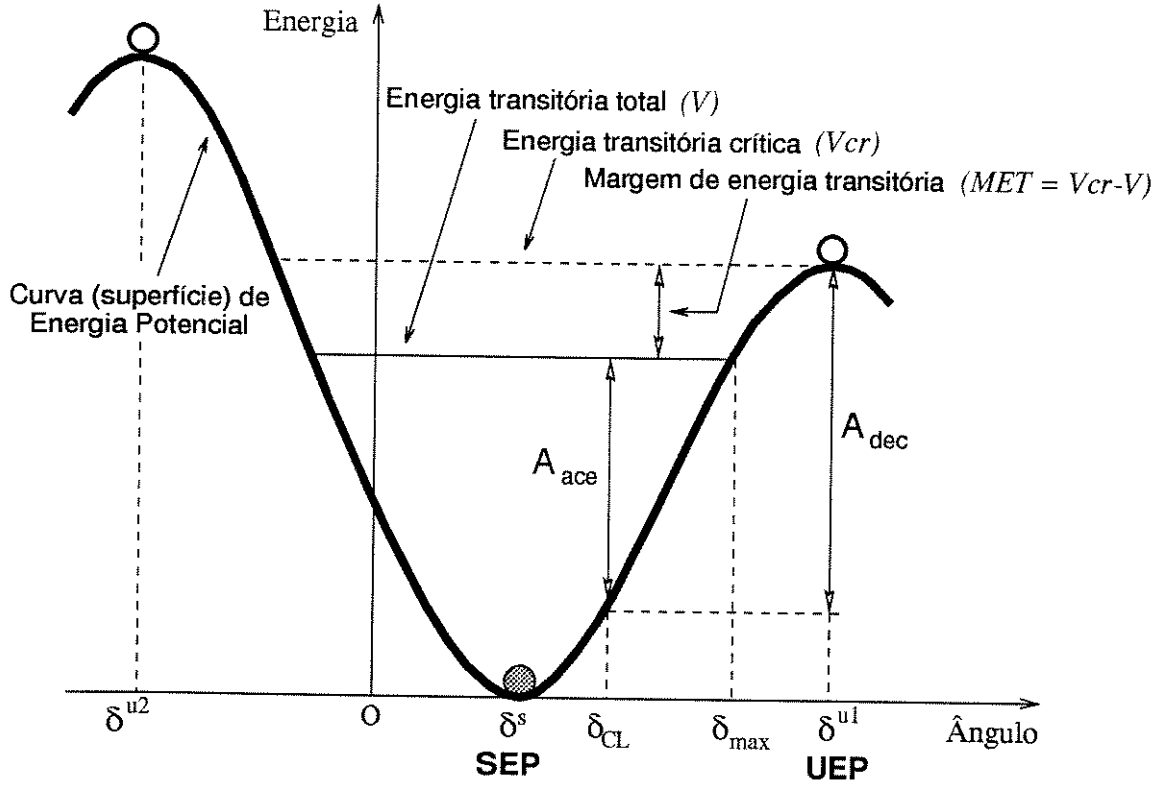


Figura 3.3: Critério da função de energia para o sistema máquina - barra infinita.

A função de energia $V(\delta, \omega)$ é conhecida também como função de energia transitória, geralmente designada pelo acrônimo TEF. Para o sistema de uma máquina contra barra infinita, a função de energia (3.24) é uma função de energia geral porque a sua derivada através da trajetória (δ, ω) do sistema (3.23) é definida por:

$$\begin{aligned}\dot{V}(\delta, \omega) &= \frac{2}{2} M \omega \dot{\omega} - P_m \dot{\delta} + P_0 \sin \delta \dot{\delta} \\ \dot{V}(\delta, \omega) &= \omega (M \dot{\omega} - P_m + P_0 \sin \delta) \\ \dot{V}(\delta, \omega) &= -D \omega^2 \leq 0\end{aligned}\tag{3.28}$$

Por conveniência $V(\delta, \omega)$ foi dividida em duas componentes, a energia cinética V_{EC} que é função da velocidade ω , e a energia potencial V_{EP} que é função do ângulo δ . A função de energia potencial é apresentada na Figura 3.3, em que os máximos locais de V_{EP} correspondem aos pontos de equilíbrio instáveis, que neste caso são δ^{u1} e δ^{u2} .

A estabilidade para esse sistema MBI pode ser determinada mediante a função de energia potencial V_{EP} da seguinte forma: se uma trajetória pós-falta (δ, ω) , depois de alcançar um máximo, começa a diminuir, então é uma trajetória pós-falta estável. Um dos máximos locais da função de energia potencial mostrada na Figura 3.3 tem de ser a energia crítica; por enquanto pode-se considerar que a energia crítica corresponde à função de energia potencial avaliada no ponto de equilíbrio instável mais próximo do ponto de equilíbrio estável, que para o caso analisado corresponde ao “menor” máximo local de V_{EP} . Esse ponto de equilíbrio instável no qual é avaliada a função de energia crítica é chamado também ponto de equilíbrio instável de controle ou ponto de equilíbrio instável interessante. Esse critério de escolher a energia crítica como aquela que apresentar o menor valor dos máximos locais corresponde ao método do ponto de equilíbrio instável mais próximo (*closest*).

Nos pontos de equilíbrio verifica-se que a velocidade ω é nula, em consequência nesses pontos há uma coincidência entre os valores da função de energia transitória $V(\delta, \omega)$ e a função de energia potencial $V_{EP}(\delta)$; por isso não há diferença em utilizar-se tanto um termo como o outro quando essas funções são avaliadas nos pontos de equilíbrio.

Agora já é descrever visualizar os principais passos algorítmicos dos métodos diretos na avaliação da estabilidade transitória:

- Passo 1.* Construir uma função de energia $V(\delta, \omega)$ para o sistema pós-falta.
- Passo 2.* Determinar o valor da energia crítica V_{cr} para uma certa trajetória sob falta. Pode ser utilizado qualquer método, por exemplo o método híbrido, o método do ponto de equilíbrio instável de controle, redes neurais, etc.
- Passo 3.* Determinar o valor da energia transitória no instante t_{cl} de eliminação da falta. Seja essa energia V_{cl} . Se a energia crítica for maior que a energia no instante de eliminação da falta então o sistema será estável, isto é, se $V_{cr} > V_{cl}$. Alternativamente pode-se definir a margem de energia como $MET = V_{cr} - V_{cl}$, e assim deve-se satisfazer a condição $MET > 0$ para haver estabilidade.

A determinação da energia crítica é fundamental nos métodos diretos TEF, e portanto se ela for calculada de forma aproximada ou imprecisa, isto consequentemente se refletirá na qualidade da avaliação da estabilidade. A energia crítica corresponde ao instante em que a trajetória sob falta cruza o limite de estabilidade; esse instante de tempo é denominado tempo crítico, que é o tempo limite para que a perturbação seja eliminada a fim de que o sistema pós-perturbação seja considerado estável.

3.4.2 Função de Energia de Sistemas Multimáquina

A seguir se apresentará uma função de energia para o sistema de potência multimáquina considerando o modelo clássico e na referência do COI. Essa função de energia foi proposta por Athay e outros em [ATHA79a].

O sistema de equações de oscilação (3.21) de um sistema de potência multimáquina corresponde à forma $\dot{x} = f(x)$ em que $x = (\theta, \tilde{\omega})$ é a trajetória do sistema. Uma função diferenciável contínua $V(\cdot)$ do sistema (3.21) é uma função de energia se for estritamente decrescente ao longo de qualquer trajetória não-trivial [CHIA87]; uma trajetória não-trivial é aquela em que não é considerado algum ponto de equilíbrio obviamente pertencente a um conjunto não-errático [GUCK83]. Isso implica basicamente que $\dot{V}(\theta, \tilde{\omega}) \leq 0$ para $(\theta, \tilde{\omega}) \in \mathbb{R}^n$. As condições impostas para definir uma função de energia geral (com perdas) são satisfeitas apenas para a função de energia do sistema de uma máquina - barra infinita, porém para os sistemas de potência com várias máquinas isso não acontece.

Apesar dos esforços para deduzir uma função de energia geral para sistemas de potência multimáquina com perdas, até agora somente foi possível a construção de funções de energia locais que levam em conta as perdas; em [CHIA89b] é mostrada a impossibilidade de obter-se funções de energia globais para sistemas de potência com perdas. A opção neste último caso é utilizar uma função de energia aproximada, também chamada função de energia numérica, que sob certas condições é estritamente decrescente.

Com a finalidade de facilitar a dedução das expressões básicas da função de energia transitória, não será considerado o amortecimento D_i , o qual posteriormente poderá ser levado em conta. Isso justifica-se pois a inclusão dos enrolamentos amortecedores nas máquinas síncronas já leva em conta o amortecimento, evitando de certa forma a inclusão de amortecimento não-uniforme. Além disso, o amortecimento uniforme também não é de importância na estabilidade de primeira oscilação, exceto nos casos em que a oscilação do sistema envolve um período muito longo.

Definindo-se a função $f_i(\theta)$, a partir da equação de oscilação (3.21), como sendo:

$$f_i(\theta) = Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} = M_i \dot{\omega}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.29)$$

uma função de energia transitória (V) de um sistema multimáquina pode ser obtida integrando-se todas as n equações (3.29), previamente multiplicadas por $\dot{\theta}_i = \dot{\omega}_i$. Proceda-se da seguinte maneira:

$$0 = \dot{\theta}_i \left[\sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i - \sum_{i=1}^n f_i(\theta) \right]$$

$$\int 0 dt = \int \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i d\tilde{\omega}_i - \int \sum_{i=1}^n f_i(\theta) d\theta_i$$

$$V(\theta, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 \Big|_{\tilde{\omega}_i^a}^{\tilde{\omega}_i^b} - \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^a}^{\theta_i^b} f_i(\theta) d\theta_i \quad (3.30)$$

$$V(\theta, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 \Big|_{\tilde{\omega}_i^a}^{\tilde{\omega}_i^b} - \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^a}^{\theta_i^b} \left[Pm_i - E_i^2 G_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} (C_{ij} \sin \theta_{ij} + D_{ij} \cos \theta_{ij}) \right] d\theta_i \quad (3.31)$$

$$V(\theta, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 \Big|_{\tilde{\omega}_i^a}^{\tilde{\omega}_i^b} - \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii}) (\theta_i^b - \theta_i^a) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij} (\cos \theta_{ij}^b - \cos \theta_{ij}^a) - \int_{\theta_i^a + \theta_j^a}^{\theta_i^b + \theta_j^b} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (3.32)$$

$$V(\theta, \tilde{\omega}) = V_{EC}(\tilde{\omega}) + V_{EP}(\theta) \quad (3.33)$$

em que $V_{EC}(\tilde{\omega})$ é a energia cinética e $V_{EP}(\theta)$ é a energia potencial.

A função de energia transitória V , indicada pela equação (3.32), é função da velocidade $\tilde{\omega}$ e do ângulo θ . Tanto as velocidades como os ângulos têm como referência a velocidade e o ângulo do centro de inércia COI, respectivamente. Os limites a e b correspondem aos instantes de tempo inicial e final do intervalo de tempo considerado no cálculo de V . Em geral, o limite a corresponde ao instante $t = 0$ de início de uma falta. Outra opção é considerar que a corresponde ao instante em que o sistema pós-falta fica em equilíbrio estável, ou seja, quando $\tilde{\omega} = 0$, porém esta condição somente será verificada quando $t = \infty$, o que na prática corresponde a um tempo de simulação extenso, por exemplo de algumas dezenas de segundos. De qualquer modo, a função de energia V não depende explicitamente do tempo.

Na avaliação da função de energia no ponto de equilíbrio instável do sistema pós-perturbação utiliza-se $b = UEP$ como limite superior e $a = SEP$ como limite inferior; isto quer dizer que a referência é a energia do ponto de equilíbrio estável; outra opção é considerar como referência o ponto de equilíbrio estável de pré-perturbação.

A função de energia cinética, V_{EC} , é função somente da velocidade $\tilde{\omega}$, e se expressa por:

$$V_{EC}(\tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 \Big|_{\tilde{\omega}_i^a}^{\tilde{\omega}_i^b} \quad (3.34)$$

A função de energia potencial, V_{EP} , é função do ângulo θ . Se as condutâncias de transferência G_{ij} (que representam as perdas) são desprezíveis obtém-se uma expressão fechada para V_{EP} ; caso contrário, esses termos (incluídos em D_{ij}) contribuem com uma parcela dependente da trajetória, ou seja:

$$V_{EP}(\theta) = - \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^a}^{\theta_i^b} f_i(\theta) d\theta_i = - \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^a}^{\theta_i^b} (Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\theta_i \quad (3.35)$$

$$V_{EP}(\theta) = - \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii})(\theta_i^b - \theta_i^a) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij}(\cos \theta_{ij}^b - \cos \theta_{ij}^a) - \int_{\theta_i^a + \theta_j^a}^{\theta_i^b + \theta_j^b} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (3.36)$$

$$V_{EP}(\theta) = V_{POS} + V_{MAG} + V_{DIS} \quad (3.37)$$

$$V_{POS}(\theta) = - \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii})(\theta_i^b - \theta_i^a) \quad (3.38)$$

$$V_{MAG}(\theta) = - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij}(\cos \theta_{ij}^b - \cos \theta_{ij}^a) \right] \quad (3.39)$$

$$V_{DIS}(\theta) = + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \int_{\theta_i^a + \theta_j^a}^{\theta_i^b + \theta_j^b} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \quad (3.40)$$

em que:

- V_{POS} = energia de posição
- V_{MAG} = energia de magnetização
- V_{DIS} = energia de dissipação

Cada termo integral da energia de dissipação é dependente da trajetória, sendo expresso por:

$$I_{ij} = \int_{\theta_i^a + \theta_j^a}^{\theta_i^b + \theta_j^b} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \quad (3.41)$$

É comum aproximar-se analiticamente essa integral assumindo uma trajetória linear [KAKI78a, ATHA79a]. Assim,

$$I_{ij} = \frac{(\theta_i^b - \theta_i^a) + (\theta_j^b - \theta_j^a)}{(\theta_i^b - \theta_i^a) - (\theta_j^b - \theta_j^a)} D_{ij} (\sin \theta_{ij}^b - \sin \theta_{ij}^a) \quad (3.42)$$

Essa aproximação linear é derivada traçando-se uma reta de θ_i^a até θ_i^b ; logo qualquer ponto sobre essa reta é definido como $\theta_i = h\theta_i^b + (1-h)\theta_i^a$, com $0 \leq h \leq 1$; dessa forma $d(\theta_i + \theta_j) = d(h(\theta_i^b - \theta_i^a + \theta_j^b - \theta_j^a))$.

A aproximação linear (equação 3.42) do termo I_{ij} pode ser bem imprecisa. Uma aproximação melhor pode ser conseguida usando-se a fórmula trapezoidal, para $t > 0$:

$$I_{ij}(n) = I_{ij}(n-1) + \frac{1}{2}D_{ij} [\cos(\theta_i(n) - \theta_j(n)) + \cos(\theta_i(n-1) - \theta_j(n-1))] \\ [\theta_i(n) + \theta_j(n) - \theta_i(n-1) - \theta_j(n-1)]; \quad n, k \geq 1, \quad n = k\Delta t \quad (3.43)$$

Deve ser ressaltado que as aproximações acima são necessárias nos casos de obtenção da energia crítica V_{cr} quando se usa o método do UEP de controle. Quando V_{cr} é calculado usando o método PEBS, então não é preciso conhecer o limite inicial de integração porque $V_{PE}(\theta)$ pode ser inicializado convenientemente, evitando-se o cálculo explícito do ponto de equilíbrio estável pós-falta θ^s . Esse ponto será esclarecido mais adiante.

FORMULAÇÃO DO SISTEMA GRADIENTE

Um sistema gradiente é uma classe de sistema dinâmico bastante útil no estudo da estabilidade dos sistemas dinâmicos não-lineares. A forma geral de um sistema gradiente definido em um conjunto aberto $W \subset \mathbb{R}^n$, é dada pela seguinte expressão [HIRS74]:

$$\dot{x} = -\text{grad } V(x) \quad (3.44)$$

em que $V : U \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função C^2 e $\text{grad } V = \left(\frac{\partial V}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial V}{\partial x_n} \right)$ é um campo vetorial.

O sistema gradiente pode ser usado na análise da estabilidade transitória com o método direto da função de energia [CHIA94]. A seguir uma dedução do sistema gradiente associado ao sistema de oscilação (3.21).

Considerando que a potência acelerante é dada pela função $f_i(\theta) = Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{M_T}P_{COI}$; e fazendo $V(x) = V_{EP}(\theta) \equiv - \int \sum_{i=1}^n f_i(\theta) d\theta_i$; tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= -\text{grad } V_{EP}(\theta) \equiv \left(\frac{\partial V_{EP}}{\partial \theta_1}, \frac{\partial V_{EP}}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial V_{EP}}{\partial \theta_n} \right) \\ \dot{\theta} &= \left(\frac{\partial}{\partial \theta_1} \int f_1(\theta) d\theta_1, \frac{\partial}{\partial \theta_2} \int f_2(\theta) d\theta_2, \dots, \frac{\partial}{\partial \theta_n} \int f_n(\theta) d\theta_n \right) \\ \dot{\theta} &= (f_1, f_2, \dots, f_n) \end{aligned}$$

Em consequência, o sistema gradiente associado ao sistema (3.21) é expresso por:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_i &= Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad (i = 1, \dots, n-1) \\ \dot{\theta}_n &= -\frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^{n-1} M_i \dot{\theta}_i\end{aligned}\tag{3.45}$$

ENERGIA DE AMORTECIMENTO UNIFORME

Nas situações em que o sistema de potência experimenta um período de oscilação muito longo e a energia transitória é pequeno o suficiente para não permitir desprezar o efeito do amortecimento, pode ser recomendável simular uma função de energia que contenha alguma informação sobre tal amortecimento. Para considerar-se amortecimento não-uniforme torna-se bem complexo e nem sempre há garantia da sua utilidade prática, por isso é suficiente dispor apenas de uma indicação da energia de amortecimento uniforme, na seguinte forma [FOUA92]:

$$V = V_{EC} + V_{EP} + V_{amort}\tag{3.46}$$

$$V_{amort} = \sum_{i=1}^n \int D_i \tilde{\omega}_i \frac{d\theta_i}{dt} dt\tag{3.47}$$

3.4.3 Energia Transitória das Máquinas Individuais

Em algumas aplicações pode ser interessante dispor de uma expressão para a energia transitória da máquina individual.

Para obter a função de energia individual de cada máquina, desprezando o amortecimento, procede-se da seguinte maneira [MICH83]: multiplica-se a i -ésima equação de oscilação do sistema pós-falta por $\dot{\theta}$ (com $D_i = 0$):

$$\left[M_i \dot{\tilde{\omega}}_i - Pm_i + Pe_i + \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \right] \dot{\theta}_i, \quad i = 1, \dots, n\tag{3.48}$$

Integra-se a equação (3.48) com relação ao tempo, usando como limite inferior $t = t_s$, sendo $\tilde{\omega}(t_s) = 0$ e $\theta(t_s) = \theta^s$ o ponto de equilíbrio estável pós-falta:

$$\begin{aligned}
V_i = & \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^2 - \left(P m_i - E_i^2 G_{ii} \right) (\theta_i - \theta_i^s) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n C_{ij} \int_{\theta_i^s}^{\theta_i} \sin \theta_{ij} d\theta_i \\
& + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n D_{ij} \int_{\theta_i^s}^{\theta_i} \cos \theta_{ij} d\theta_i + \frac{M_i}{M_j} \int_{\theta_i^s}^{\theta_i} P_{COI} d\theta_i, \quad i = 1, \dots, n
\end{aligned} \quad (3.49)$$

$$V_i = V_{ECi} + V_{EPi} \quad (3.50)$$

em que para a máquina i :

V_i = função de energia transitória da máquina individual

V_{ECi} = função de energia cinética individual

V_{EPi} = função de energia potencial individual

Segundo o critério de Lyapunov necessita-se da derivada da função de energia individual $\dot{V}_i$. Uma expressão de $\dot{V}_i$, obtida a partir das equações (3.48) e (3.19), é mostrada a seguir:

$$\dot{V}_i = \tilde{\omega}_i \left[-D_i \tilde{\omega}_i - \left(D_i - \frac{M_i}{M_T} D_0 \right) \omega_0 \right] \quad (3.51)$$

Nos casos especiais de amortecimento uniforme e de amortecimento nulo tem-se, respectivamente:

$$\dot{V}_i = -D_i \tilde{\omega}_i^2 \quad (3.52)$$

$$\dot{V}_i = 0 \quad (3.53)$$

para $i = 1, \dots, n$.

Tem sido conjecturado na literatura, e muitas simulações assim o demonstram, que V_i é definida positiva [ATHA79a, FOUA81a, PAI 81]. Além disso, segundo as equações de $\dot{V}_i$ mostradas, considera-se que $\dot{V}_i < 0$, exceto na origem, e ainda, para as máquinas críticas, $\dot{V}_i$ é semidefinida negativa.

3.5 Análise da Estabilidade Transitória usando a Função de Energia

A função de energia transitória apresentada permite estimar qualitativa e quantitativamente a estabilidade transitória dos sistemas de potência. Quando um sistema de potência é submetido a uma grande perturbação existe um excesso (ou déficit) de energia associado às máquinas síncronas, que levam às máquinas a se movimentarem ou oscilarem muito longe do equilíbrio. Esse movimento leva à interpretação de que o excesso de energia é convertido em energia cinética (ou que o déficit de energia é retirado da energia cinética das massas em rotação). Se o sistema não é capaz de absorver esse excesso de energia então perderá a sua estabilidade. A capacidade do sistema de absorção do excesso de energia dependerá principalmente da sua capacidade de conversão dessa energia em energia potencial. Para uma configuração de pós-perturbação e uma condição de operação dada, existe um nível de energia transitória chamada energia transitória crítica, que indica a máxima energia que o sistema pode absorver e converter em outros tipos de energia. Por outro lado, a margem de energia transitória é a diferença entre a energia crítica e a energia no início do período pós-perturbação. [ATHA79b, FOUA81a, FOUA81b, FOUA81c].

Para realizar a análise da estabilidade transitória mediante a função de energia é essencial obter a energia crítica. O ponto no qual essa energia crítica é avaliada é o que marca a diferença entre os vários métodos TEF. O método mais aceito atualmente consiste em avaliar a função de energia no ponto de equilíbrio instável de controle, e considerar esse valor como a energia crítica. Esse valor da energia crítica é comparado com o valor da função de energia em um instante dado de eliminação de uma contingência. Se a energia crítica for maior, então o sistema é estável para essa condição de operação e configuração pós-perturbação; caso contrário, o sistema será declarado instável. Vários dos métodos TEF diretos possuem uma característica comum com os métodos no domínio do tempo, pois realizam a simulação numérica do sistema sob falta pelo menos até o instante de eliminação da perturbação. Tentando evitar a simulação e acelerar ainda mais a determinação da estabilidade, alguns métodos TEF usam uma aproximação da trajetória do sistema sob falta, por exemplo, pode-se usar uma aproximação do tipo cosseno [ATHA79b], ou uma aproximação por série de Taylor [PAVE94]. Neste trabalho não é usada nenhuma dessas aproximações, porém essa segunda opção foi investigada e comprovou-se que para tempos de eliminação abaixo de 0.1 s os resultados são satisfatórios em sistemas de pequeno a médio porte.

O maior problema computacional dos métodos TEF é a determinação do ponto de equilíbrio instável de controle (os detalhes do cálculo desse ponto serão tratados no próximo capítulo), que é necessário para o cálculo da energia crítica. É por esse motivo que vários métodos TEF não calculam o UEP de controle e alternativamente utilizam aproximações para determinar a energia crítica.

Nesta seção serão mostrados os aspectos relevantes para analisar a estabilidade transitória utilizando a função de energia transitória, tais como os pontos de equilíbrio, expressão da energia crítica, tempo de eliminação crítico, máquinas críticas, energia cinética corrigida, margem de energia transitória, e um algoritmo geral para a análise da estabilidade com o método TEF.

A. CONCEITO BÁSICO DE PONTOS DE EQUILÍBRIO

Os pontos de equilíbrio correspondem às situações em que a velocidade angular e a potência acelerante do sistema são iguais a zero. Na condição de pré-perturbação o sistema está em sincronismo no regime permanente, portanto, essa condição é um ponto de equilíbrio, chamado de ponto de equilíbrio estável de pré-perturbação, que na referência do COI será designado por θ^{s1} . Durante o período de perturbação e devido aos intercâmbios e conversões de energia, o sistema experimenta situações instantâneas em que sua energia cinética passa por um mínimo (velocidade mínima), enquanto que a energia potencial alcança seu máximo valor; é nesse instante que o sistema sai do seu limite de estabilidade; esse ponto chama-se ponto de saída e na referência do COI será representado por θ^{ex} . No período pós-perturbação o sistema deve chegar a um (geralmente novo) ponto de operação no regime permanente (velocidade nula); esse ponto chama-se ponto de equilíbrio estável pós-perturbação ou SEP, que na referência do COI será representado por θ^{s2} . O ponto θ^{s2} define uma região de atração, denominada região de estabilidade, que pode ser caracterizada usando a superfície de energia potencial (por exemplo ver a Figura 4.4). Essa superfície, no espaço de três dimensões, lembra uma paisagem, com montanhas, declives, vales, etc. Os máximos locais dessa paisagem são os pontos de equilíbrio instáveis ou UEP (na referência do COI serão representados como θ^u) e o mínimo local corresponde ao SEP de pós-perturbação. O ponto de equilíbrio instável de controle ou UEP de controle, é um UEP relevante associado à trajetória sob perturbação. Uma discussão aprofundada da região de estabilidade e do UEP de controle é dada no capítulo 4.

Matematicamente os pontos de equilíbrio estável e instável de pós-perturbação (θ^{s2} e θ^u) são calculados resolvendo-se o seguinte sistema para a condição de pós-perturbação:

$$f_i(\theta) = Pm_i^{pf} - Pe_i^{pf} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}^{pf} = 0, \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3.54)$$

Dependendo do ponto inicial fornecido, a solução do sistema (3.54) poderá corresponder a um UEP ou a um SEP. Para sistemas de pequeno porte a solução dos pontos de equilíbrio de pós-perturbação é relativamente simples.

B. AVALIANDO A FUNÇÃO DE ENERGIA TRANSITÓRIA

A função de energia associada ao sistema (3.21) em geral é definido tomando como referência o sistema pós-contingência e a energia do SEP pós-perturbação; é dado pela seguinte equação:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\bar{\omega}_i)^2 - \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii})(\theta_i - \theta_i^{s2}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij}(\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^{s2}) - I_{ij}] \quad (3.55)$$

em que: $I_{ij} = \int D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)$.

A energia transitória V_{cl} no instante t_{cl} de eliminação de uma perturbação, pode ser expressa tomando-se como referência o SEP pós-perturbação:

$$\begin{aligned} V_{cl} &= V|_{\theta^{s2}}^{\theta^{cl}} \\ V_{cl} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\tilde{\omega}_i^{cl})^2 \\ &\quad - \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii})(\theta_i^{cl} - \theta_i^{s2}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij}(\cos \theta_{ij}^{cl} - \cos \theta_{ij}^{s2}) - I_{ij}^{cl}] \quad (3.56) \end{aligned}$$

Alguns autores consideram como referência o ponto de equilíbrio estável de pré-perturbação θ^{s1} no cálculo de V_{cl} , ou seja, eles definem :

$$V_{cl} = V|_{\theta^{s1}}^{\theta^{cl}}$$

Nesse caso, para obter a energia V_{cl} no ponto θ^{s2} , deve-se acrescentar um termo de correção da seguinte maneira:

$$V_{cl} = V|_{\theta^{s1}}^{\theta^{cl}} - V|_{\theta^{s1}}^{\theta^{s2}} \quad (3.57)$$

C. ENERGIA TRANSITÓRIA CRÍTICA

Essa energia corresponde à energia potencial do ponto de equilíbrio instável de controle θ^u para uma certa perturbação sob consideração. Pressupõe-se que a trajetória do sistema possua velocidade nula quando passar pelo UEP de controle, momento em que a energia crítica coincide com a energia potencial avaliada no ponto θ^u , pois a energia cinética é igual a zero nesse ponto.

É preciso usar uma única referência no cálculo da energia potencial crítica, e usualmente adota-se o ponto de equilíbrio estável pós-falta θ^{s2} ; assim, a expressão que define a energia crítica é dada por:

$$\begin{aligned} V_{cr} &= V|_{\theta^{s2}}^{\theta^u} \\ V_{cr} &= - \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii})(\theta_i^u - \theta_i^{s2}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij}(\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}^{s2}) - I_{ij}^{cr}] \quad (3.58) \end{aligned}$$

Na equação (3.58) o termo integral dependente da trajetória, I_{ij}^{cr} , pode ser calculado usando a aproximação linear (3.42) ou a aproximação trapezoidal (3.43) que oferece maior precisão.

D. GERADORES CRÍTICOS E ENERGIA CINÉTICA CORRIGIDA

Os geradores críticos são aqueles mais susceptíveis a perder a estabilidade quando ocorre determinada perturbação. A energia cinética transitória que origina a separação dos geradores críticos do resto do sistema deve-se ao movimento dos geradores críticos, ou seja, é a energia cinética do centro inercial dos geradores críticos em relação à energia cinética dos outros geradores. Segundo essa hipótese, observa-se que não é a energia cinética total do sistema ao final da perturbação que conduz à instabilidade, mas sim deve-se descontar a porção de energia cinética envolvida nas oscilações intermáquinas que não contribui para separar os geradores críticos do resto do sistema. Portanto, para realizar uma avaliação mais precisa da estabilidade transitória usando o método direto TEF, a componente da energia cinética que não contribui para a instabilidade deve ser subtraída da energia que o sistema absorverá para manter a sua estabilidade. [FOUA81a, FOUA81b, FOUA81c].

A velocidade angular do centro inercial de k máquinas críticas, bem como a sua energia cinética, são dadas pelas seguintes expressões:

$$\tilde{\omega}_{cr} = \frac{\sum_{i=1}^k M_i \tilde{\omega}_i}{\sum_{i=1}^k M_i} \quad (3.59)$$

$$V_{EC_{cr}} = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^k M_i \right] (\tilde{\omega}_{cr})^2 \quad (3.60)$$

Se o grupo de máquinas críticas tem geradores com inércia muito grande, a energia cinética do grupo crítico corresponderá à energia responsável pela separação desses geradores do sistema. Portanto é evidente que a energia cinética corrigida $V_{EC_{cr}}$ deve ser a energia cinética a ser utilizada na expressão de V_{cl} .

Se as inércias dos geradores críticos não são grandes, ou seja, se o centro inercial não é estacionário, a determinação da energia responsável pela separação não é tão simples de calcular, pois o movimento dos dois grupos é parecido com o movimento de um sistema de duas máquinas. Considerando-se que os centros inerciais e as velocidades angulares das máquinas críticas e do resto dos geradores são dados por M_{cr} , $\tilde{\omega}_{cr}$ e M_{sys} , $\tilde{\omega}_{sys}$, respectivamente, a energia que origina a separação dos dois grupos é a mesma de um sistema MBI com inércia constante M_{eq} e velocidade angular $\tilde{\omega}_{eq}$, dadas pelas expressões:

$$M_{eq} = \frac{M_{cr} \cdot M_{sys}}{M_{cr} + M_{sys}} \quad (3.61)$$

$$\tilde{\omega}_{eq} = (\tilde{\omega}_{cr} - \tilde{\omega}_{sys}) \quad (3.62)$$

e a respectiva energia cinética corrigida é dada por:

$$V_{EC_{corr}} = \frac{1}{2} M_{eq} (\bar{\omega}_{eq})^2 \quad (3.63)$$

Essa expressão deve ser usada em substituição à energia cinética na equação (3.56) da energia transitória V_{cl} .

Observa-se que quando a razão M_{sys}/M_{cr} é grande, as equações (3.60) e (3.63) dão resultados muito próximos.

Um critério para determinar as máquinas críticas é determinar as máquinas avançadas a partir do ponto de equilíbrio instável de controle, sendo que uma máquina avançada é aquela cujo ângulo do rotor é maior de 90 graus elétricos [FOUA81b, FOUA81c]. Outro critério, porém menos utilizado, é aquele que usa as acelerações das máquinas no instante t_0^+ [TOUM86]. Neste trabalho confirmou-se que a escolha das máquinas críticas a partir do UEP de controle é o mais adequado, porém existe a necessidade de primeiro determinar o UEP de controle para somente depois estabelecer as máquinas críticas. Em vista dessa dificuldade, decidiu-se utilizar neste trabalho as tensões terminais no instante t_0^+ para determinar quais são as máquinas críticas; o critério é heurístico, baseado em observações experimentais, e consiste em selecionar como as máquinas críticas aquelas cujas tensões terminais são menores que um certo valor V_{min} ; por exemplo $V_{min} = 0.8$ pu tem sido um valor adequado para diversos sistemas e condições de operação, contudo o usuário pode escolher um valor mais apropriado ao seu sistema. A grande vantagem desse critério, que é inédito, é evitar o intenso trabalho de calcular o UEP de controle para saber a priori quais são as máquinas críticas.

E. MARGEM DE ENERGIA TRANSITÓRIA

A margem de energia transitória ΔV (ou *MET*) é definida como a diferença entre a energia crítica avaliada no UEP de controle e a energia no instante de eliminação da falta:

$$\Delta V = V_{cr} - V_{cl} \equiv V|_{\theta_{cl}}^{\theta_u} \quad (3.64)$$

Na sua forma expandida, a margem de energia é expressa por:

$$\begin{aligned} \Delta V = & -\frac{1}{2} M_{eq} (\bar{\omega}_{eq}^{cl})^2 \\ & - \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii})(\theta_i^u - \theta_i^{cl}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij}(\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}^{cl}) - I_{ij}^{ucl}] \end{aligned} \quad (3.65)$$

em que $(\theta^{cl}, \tilde{\omega}^{cl})$ é a trajetória no instante de eliminação da falta e $(\theta^u, 0)$ refere-se ao ponto de equilíbrio instável de controle.

Como se vê, a avaliação da margem de energia transitória precisa somente do ponto de equilíbrio instável de controle e do ponto no instante de eliminação da perturbação, não havendo necessidade de calcular a energia em cada um desses pontos. É fácil notar que o ponto de equilíbrio estável pós-falta θ^{s2} não precisa ser obtido explicitamente quando se quer calcular apenas a margem de energia. Caso as energias V_{cr} e V_{cl} forem calculadas separadamente, deve-se ter cuidado de calcular cada uma delas usando a mesma referência, normalmente o ponto de equilíbrio estável pós-perturbação.

O termo dependente da trajetória, I_{ij}^{ucl} , quando se usa a aproximação linear, é dado por:

$$I_{ij}^{ucl} = D_{ij} \frac{\theta_i^u - \theta_i^{cl} + \theta_j^u - \theta_j^{cl}}{\theta_{ij}^u - \theta_{ij}^{cl}} (\sin \theta_{ij}^u - \sin \theta_{ij}^{cl})$$

O critério para a estabilidade é que a margem de energia seja positiva, ou seja, $\Delta V > 0$. Caso contrário o sistema não será considerado estável.

Para calcular o grau de estabilidade ou de instabilidade do sistema utiliza-se o conceito de margem de energia normalizada em relação à energia cinética corrigida ao final da perturbação, definida pela seguinte expressão [FOUA81a]:

$$\Delta V_n = \frac{\Delta V}{V_{EC_{corr}}} \quad (3.66)$$

No caso estável ($\Delta V_n > 0$), ΔV_n indica o grau de estabilidade; por outro lado no caso instável ($\Delta V_n < 0$), ΔV_n indica o grau de instabilidade do sistema de potência. Com a margem de estabilidade normalizada é possível a comparação da estabilidade de vários cenários, viabilizando uma ferramenta eficiente para análise e ranking dinâmico de contingências.

F. TEMPO CRÍTICO DE ELIMINAÇÃO

Esse tempo é definido como o tempo máximo para que uma perturbação seja eliminada de modo que o sistema não perca a sua estabilidade transitória. Corresponde ao tempo em que a função de energia transitória do sistema no instante de eliminação atinge o valor da energia transitória crítica. Em outras palavras, se a falta for eliminada no tempo crítico então $\Delta V = \Delta V_n = 0$.

Conceitualmente o algoritmo para calcular o tempo crítico t_{cr} consiste em calcular a energia crítica, depois volta-se a integrar o sistema sob falta até o instante em que a energia transitória é igual à energia crítica; esse tempo corresponde ao tempo crítico. Um procedimento prático para estimar t_{cr} consiste em realizar duas simulações para tempos de eliminação t_1 e t_2 , de forma

que as correspondentes energias transitórias V_1 e V_2 sejam uma menor e outra maior que V_{cr} ; em seguida, mediante interpolação linear, pode-se estimar t_{cr} .

Uma versão mais completa e detalhada desse procedimento de cálculo do tempo crítico t_{cr} é mostrada no seguinte algoritmo:

Passo 1. Ajustar o valor do número máximo de iterações i_{max} considerando que $i_{max} > 1$ (p.ex. $i_{max} = 3$); ajustar o valor da tolerância ϵ (p.ex. $\epsilon = 0.001$); inicializar o contador $i = 1$ e o tempo t_i (p.ex. $t_1 = t_{cl}$). Considerar $V_0 = 0$, $t_0 = 0$.

Passo 2. Calcular o ponto de equilíbrio instável de controle θ^u e determinar o valor da energia crítica V_{cr} .

Passo 3. Integrar o sistema sob perturbação até o instante t_i e calcular a energia transitória V_i .

Passo 4. Se $|V_{cr} - V_i| < \epsilon$ ou $i = i_{max}$, parar e considerar $t_{cr} = t_i$ como o tempo crítico desejado.

Passo 5. Estimar um novo tempo crítico t_{new} mediante interpolação linear, usando a fórmula dada a seguir:

$$t_{new} = \frac{(V_{cr} - V_{i-1})(t_i - t_{i-1})}{V_i - V_{i-1}} + t_{i-1} \quad (3.67)$$

Passo 6. Incrementar o contador $i = i + 1$; fazer $t_i = t_{new}$ e voltar ao Passo 3.

Comentários: A energia transitória V_i é calculada no instante inicial do sistema pós-perturbação, imediatamente após a eliminação da perturbação realizada em t_i . Depois de cada iteração devem ser armazenados os dois valores mais recentes de V_i e t_i . Todos os valores das energias transitórias devem levar em conta as correções da energia cinética (energia que não contribui para separação do sistema) e da energia potencial (utilizar uma mesma referência, por exemplo θ^{s2}).

G. ALGORITMO DO MÉTODO DIRETO TEF DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE

Existem várias alternativas para implementar um método direto baseado na função de energia para analisar a estabilidade transitória. Uma opção simples é determinar apenas a estabilidade e nesse caso o método estará orientado para o cálculo da margem de energia, sendo suficiente calcular o UEP de controle, a energia crítica e a energia no instante de eliminação da perturbação. Se o algoritmo estiver orientado para determinar além disso o tempo crítico, então pode-se adotar um algoritmo baseado naquele algoritmo proposto anteriormente nesta seção. Caso o método TEF seja aplicado à análise da segurança dinâmica *on-line* deve-se utilizar a margem de energia transitória normalizada, sendo que para uma mesma condição de operação terá de ser calculada uma margem de energia para cada configuração de pós-perturbação de uma lista pré-estabelecida de contingências.

A característica principal dos métodos TEF exatos consiste no cálculo preciso do UEP de controle, que de longe é a tarefa mais complexa e difícil a enfrentar. A discussão dos métodos de cálculo do UEP de controle será realizada no capítulo 4.

Um algoritmo geral do método direto baseado na função de energia transitória para determinar a estabilidade transitória deve ter os seguintes passos (supondo modelo clássico e redução da matriz Y):

- Passo 1.* Realizar a leitura dos dados de entrada compostos pelos parâmetros das máquinas síncronas e dados da rede elétrica, resultados do fluxo de potência básico, e dados da contingência a analisar. Calcular as tensões internas (magnitudes e ângulos) e potências elétricas iniciais, de pré-perturbação.
- Passo 2.* Construir a matriz admitância Y_{red} para o sistema nas condições de perturbação e pós-perturbação.
- Passo 3.* Calcular o ponto de equilíbrio estável pós-falta ao resolver a equação (3.54) usando a condição de operação pré-perturbação como o ponto inicial.
- Passo 4.* Integrar numericamente as equações de oscilação do sistema sob falta até o instante t_{cl} de eliminação da falta, com a finalidade de obter a condição de operação em t_{cl} .
- Passo 5.* Determinar o ponto de saída da região limite de estabilidade mediante a integração numérica do sistema sob falta (detalhado no capítulo 4).
- Passo 6.* Resolver o sistema de equações (3.54) para calcular o ponto de equilíbrio instável de controle do sistema pós-falta (UEP de controle).
- Passo 7.* Calcular a energia crítica avaliada no UEP de controle, levando em conta a correção da energia cinética.
- Passo 8.* Calcular a margem de energia transitória e a margem de energia normalizada; determinar a estabilidade transitória do sistema.

Comentários : Esse algoritmo TEF pode apresentar algumas variantes dependendo dos objetivos do estudo a ser realizado pelo usuário. Por exemplo, se somente é requerido o diagnóstico da estabilidade do sistema, os passos 4 e 5 podem ser realizados utilizando-se uma única integração numérica do sistema sob perturbação até determinar o ponto de saída no instante t_{ex} ; se $t_{cl} > t_{ex}$ conclui-se que o sistema é instável para esse t_{cl} e a integração continuaria até t_{cl} apenas nos casos em que é absolutamente necessário o conhecimento da margem de energia transitória ou especificamente o índice de estabilidade ou de instabilidade. O cálculo do ponto de equilíbrio estável pós-perturbação pode ser evitado quando o interesse é apenas a determinação da margem de energia. Os detalhes para determinar o ponto de saída bem como o ponto inicial para calcular o UEP de controle serão tratados no capítulo 4.

3.6 Testes do Método TEF e Discussão de Resultados

Para testar os diversos algoritmos que viabilizam a aplicação do método direto da função de energia na análise da estabilidade transitória será utilizada uma versão do programa *Transtef* desenvolvido pelo autor durante esta pesquisa (ver Apêndice C). Os sistemas de teste estão documentados no Apêndice A. Devido à abrangência das aplicações dos métodos TEF, somente serão discutidos os resultados mais relevantes da metodologia geral TEF sugerida.

A. COMPONENTES DA ENERGIA TRANSITÓRIA

A ocorrência de uma perturbação, por exemplo causada por um curto-circuito em um dos extremos de uma linha de transmissão, sob o ponto de vista energético corresponde a um ganho de energia por parte do sistema até a eliminação da perturbação. Se a duração da contingência for muito grande o sistema poderá não absorverá toda a energia recebida, e a energia que não for absorvida será convertida em energia de aceleração, o que provavelmente causará uma instabilidade.

Se uma perturbação é eliminada causando uma mudança na topologia do sistema, a energia transitória e a energia potencial no instante inicial são iguais e diferentes de zero porque as configurações do sistema pré e pós-perturbação são diferentes. A energia cinética no instante inicial da perturbação considera-se igual a zero, independentemente se a perturbação é eliminada com ou sem mudança de topologia.

Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme

Inicialmente será estudada a energia transitória considerando sistemas com amortecimento uniforme, que vem a ser um caso mais otimista de estabilidade. Os testes serão realizados com o sistema ABIAD4 em que uma grande perturbação é simulada mediante a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminada sem desligamento de linha, ou seja, é uma contingência auto-eliminada (*self-cleared*). Duas simulações foram estudadas para dois tempos de eliminação, $t_{cl} = 0.43$ s e $t_{cl} = 0.50$ s. Os resultados da energia transitória e as suas componentes são apresentados nas Figuras 3.4 e 3.5. O primeiro caso corresponde a uma condição de estabilidade e o segundo de instabilidade. O critério para diagnosticar a estabilidade consiste na comparação entre o valor da energia crítica $V_{cr} = 2.1026$ pu e o valor da energia transitória V no instante de eliminação da perturbação. O amortecimento do sistema no caso estável faz diminuir a energia V no período pós-perturbação, que deverá voltar ao seu valor inicial no tempo infinito. No caso instável, tanto a energia transitória V quanto a energia potencial V_{EP} diminuem, tornando-se cada vez mais negativas, entanto que a energia cinética V_{EC} aumenta, apresentando um valor médio maior que a energia crítica V_{cr} . A energia V_{EP} não ultrapassou a energia crítica, no caso da instabilidade.

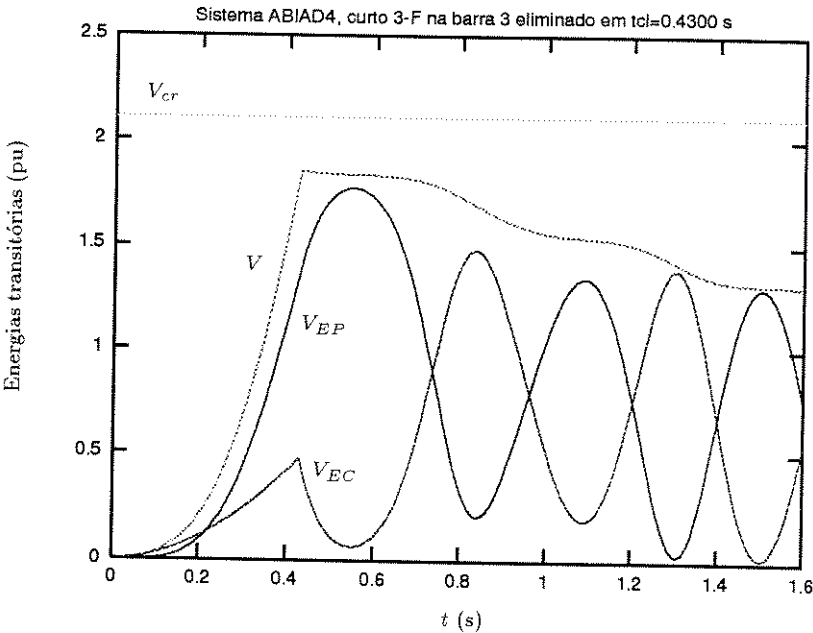


Figura 3.4: Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso estável.

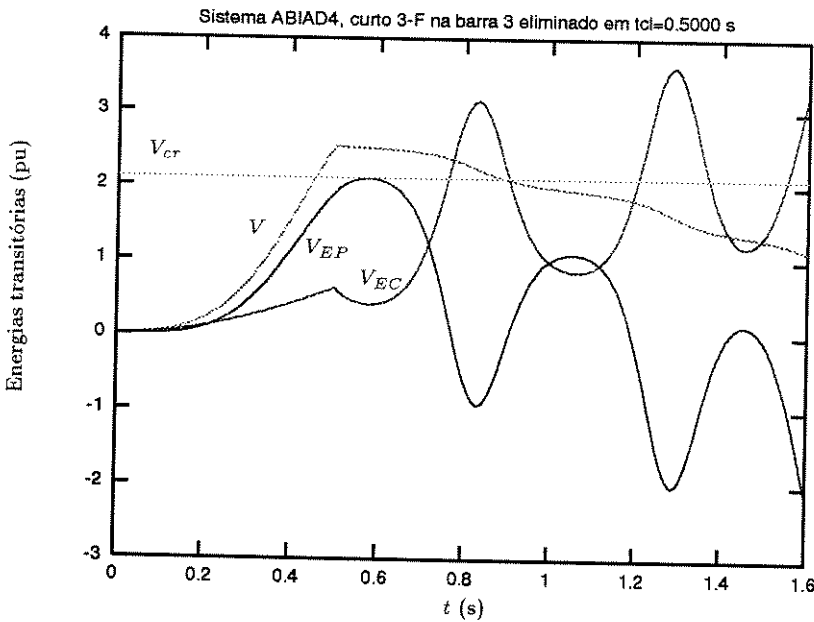


Figura 3.5: Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso instável.

Os testes seguintes consideram casos de sistemas de potência sem amortecimento, que será desprezado pois a idéia é simular sistemas sob condições mais pessimistas.

Sistema ABIAD4

Com a finalidade de realizar algumas comparações novamente será testado o sistema ABIAD4, desta vez sem considerar amortecimento, e para os mesmos tempos de eliminação considerados nos dois testes com amortecimento, bem como para a mesma contingência. Os resultados dos estudos de estabilidade com a função de energia simulada no tempo são ilustrados nas Figuras 3.6 e 3.7, para os casos estável e instável, respectivamente. Claramente observa-se que a energia transitória atinge seu máximo valor no instante de eliminação da perturbação e depois permanece praticamente constante durante o período pós-perturbação. A energia crítica continua sendo $V_{cr} = 2.1026$ pu, embora as margens de energia transitória são menores se comparadas ao caso anterior. No caso estável, as energias cinética e potencial não são amortecidas e ficam oscilatórias. Para a situação instável, a energia cinética aumenta indefinidamente e a potencial diminui também em forma análoga e simétrica ao aumento da energia cinética.

Sistema IEEE50

A metodologia também foi aplicada a sistemas de grande porte como o sistema IEEE50 de 50 geradores. As Figuras 3.8 e 3.9 ilustram os resultados obtidos para os casos normal e estressado, respectivamente. O caso sob estresse foi gerado elevando-se a potência de saída dos geradores das barras 93 e 110, até o valor de 1500 MW em cada gerador, sendo que no caso base essas potências são de 700 MW cada; a perturbação é um curto-circuito trifásico na barra 7.

Para ambos os dois testes a energia transitória e suas componentes conservam as características descritas para os sistemas sem amortecimento, ou seja, a energia transitória aumenta até o instante de eliminação da contingência e depois se mantém constante pelo resto do tempo. As energias cinética e potencial também são oscilatórias. Pode-se notar que a energia transitória inicial é diferente de zero e igual à energia potencial pois a perturbação é eliminada mediante uma mudança topológica: a desconexão da linha 6-7. Para o caso não-estressado, a energia crítica, a energia transitória no instante de eliminação da perturbação ($t_{cl}^{ne} = 0.095$ s), e a margem de energia transitória são dadas por: $V_{cr}^{ne} = 7.66$ pu, $V^{ne} = 6.915$ pu, e $\Delta V^{ne} = 0.745$ pu, respectivamente. Analogamente, para o caso estressado ($t_{cl}^{es} = 0.04$ s) tem-se: $V_{cr}^{es} = 2.532$ pu, $V^{es} = 2.301$ pu, e $\Delta V^{es} = 0.231$ pu.

É importante verificar que o caso sob estresse apresenta uma energia crítica bem menor que a do caso não-estressado; isso significa que a capacidade do sistema para absorver o impacto de uma grande perturbação fica menor quando o sistema opera sob estresse, no limite essa energia crítica teria de ser nula, o que é interpretado como uma coincidência do ponto de equilíbrio instável de controle com o ponto de equilíbrio estável pós-falta. Se $V_{cr} = 0$ o sistema resultará instável para qualquer perturbação.

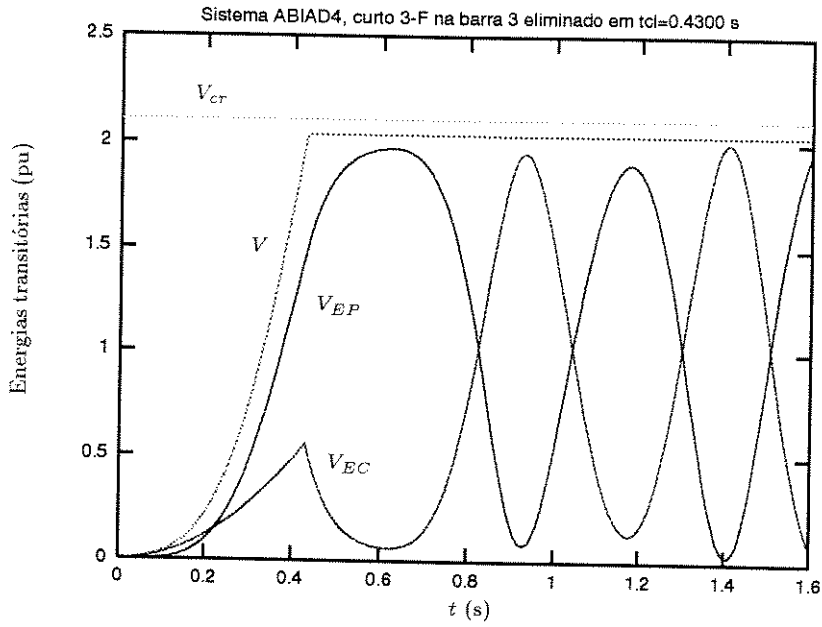


Figura 3.6: Sistema ABIAD4 sem amortecimento. Componentes da função de energia, caso estável.

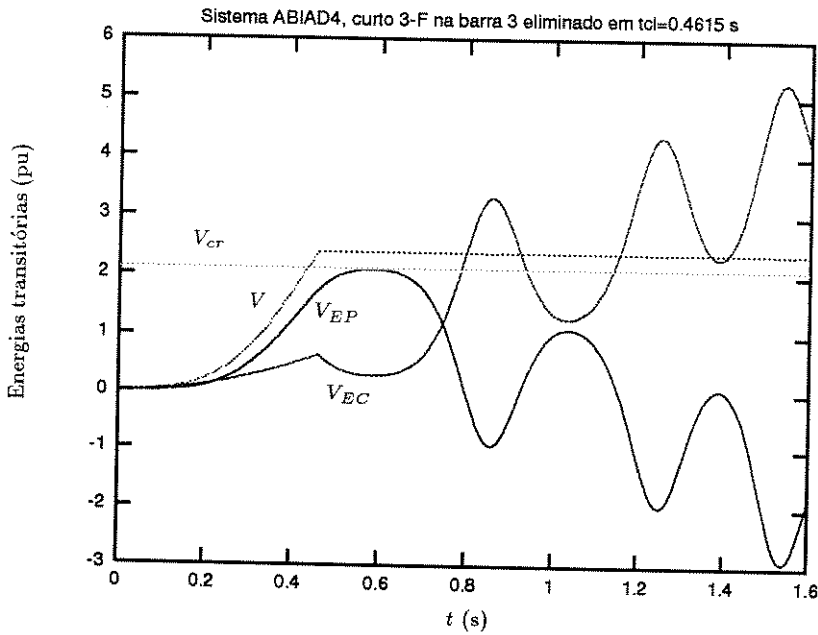


Figura 3.7: Sistema ABIAD4 sem amortecimento. Componentes da função de energia, caso instável.

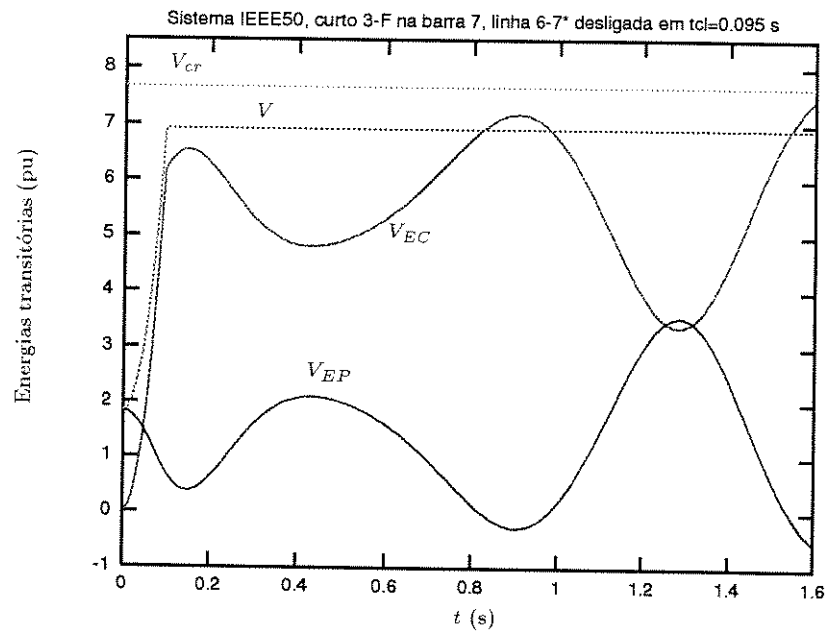


Figura 3.8: Sistema IEEE50. Componentes da função de energia, sistema estável caso não-estressado.

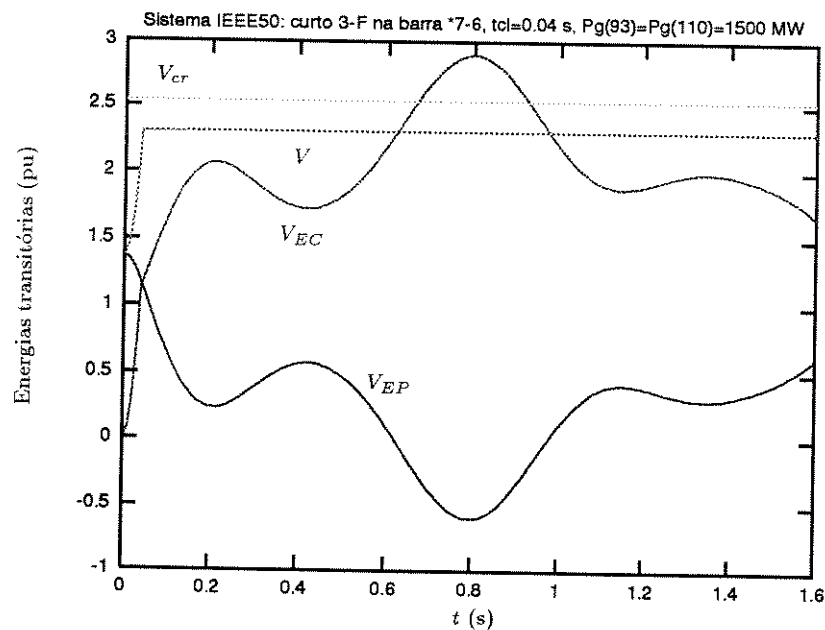


Figura 3.9: Sistema IEEE50. Componentes da função de energia, sistema estável caso sob estresse.

Sistema WSCC4

Os pontos de equilíbrio desse sistema foram apresentados inicialmente em [FOUA81a, FOUA81b, FOUA81c]. A contingência a ser estudada é um curto-circuito na barra 10 que será eliminado desligando-se um dos ramos 8-10*. Na Tabela 3.2 são mostrados os pontos de equilíbrio estáveis de pré e pós-perturbação, θ^{s1} e θ^{s2} , o ponto no instante de eliminação da perturbação (θ^{cl}), o ponto de saída θ^{ex} e o UEP de controle θ^u . Para calcular θ^{s2} o valor de partida foi θ^{s1} e para o cálculo de θ^u a condição inicial foi o ponto de saída θ^{ex} . Duas iterações foram suficientes para calcular θ^{s2} e mais outras duas para calcular θ^u , ambos para uma tolerância $F = \sum_{i=1}^n (f_i^2) < 10^{-6}$.

Tabela 3.2: Sistema WSCC4, pontos de equilíbrio para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado ao desligar um ramo 8-10* em $t^{cl} = 0.15$ s.

Gerador No.	θ^{s1}	θ^{cl}	θ^{ex}	θ^{s2}	θ^u	Barra No.
1	-4.08	-9.79	-26.70	-7.43	-27.72	1
2	2.47	1.16	-6.31	0.99	-5.52	2
3	-2.81	-4.30	-13.71	-4.30	-11.32	3
4	13.92	37.01	111.37	28.46	113.25	11
Todos os ângulos em [graus] na referência do ângulo do COI. θ^{ex} calculado em 09 passos, (6 + 3); $t_{ex} = 0.30835$ s. θ^{s2} calculado em 02 iterações Newton-Raphson ($F = 1.693D - 07$). θ^u calculado em 02 iterações Newton-Raphson ($F = 1.214D - 13$).						

Na literatura [FOUA92, FOUA81b, FOUA81c] considera-se como máquinas críticas as que apresentarem $\theta_i^u > \theta_L = 90^\circ$. O vetor das tensões terminais no instante inicial da perturbação é $V_t = (0.9801, 0.8577, 0.8397, 0.3582)^T$ pu, e pode servir para definir como máquinas críticas (ou avançadas) aquelas com $V_{t_i} < V_L = 0.8$ pu, permitindo descobrir as máquinas críticas já desde o instante $t = 0^+$ de início da perturbação. Usando um ou outro critério a máquina crítica é o gerador 4. Os valores limiares V_L e θ_L podem ser sintonizados para cada sistema em particular.

Sistema IEEE17

Esse sistema foi estudado considerando-se a ocorrência de um curto-circuito trifásico na barra 26, eliminado com o desligamento da linha 25-26* em $t_{cl} = 0.15$ s. A Tabela 3.3 mostra os resultados dos pontos de equilíbrio pós-perturbação, além de outros pontos de interesse como o ponto de saída utilizado como condição inicial para o cálculo do UEP de controle. Os pontos de equilíbrio desse caso, descritos em [FOUA81a, FOUA81b, FOUA81c], mostram valores bastante próximos dos obtidos com o programa *Transtef*. Neste trabalho o fluxo de potência do sistema IEEE17 foi rodado considerando 12 barras de geração, conforme indicado no arquivo original fornecido segundo [IEEE92], e a estabilidade transitória foi simulada considerando 17 geradores

síncronos; não é conhecido pelo autor o critério usado em [FOUA81b, FOUA81c] nem o de [IEEE92]. No cálculo do UEP de controle gastaram-se 10 iterações, confirmando a dificuldade no cálculo dos UEP quando os sistemas são maiores.

Tabela 3.3: Sistema IEEE17, pontos de equilíbrio para um curto-circuito trifásico na barra 26, eliminado ao desligar a linha 25-26* em $t_{cl} = 0.15$ s.

Gerador No.	θ^{s1}	θ^{cl}	θ^{ex}	θ^{s2}	θ^u	Barra No.
1	-6.26	-7.07	-6.85	2.73	14.04	3
2	20.33	24.48	36.48	33.52	81.86	6
3	5.35	1.95	-6.56	1.30	-6.02	15
4	-4.43	-9.07	-22.92	-16.62	-41.85	27
5	15.45	34.64	85.58	27.18	157.88	73
6	17.10	52.39	164.42	31.68	149.08	76
7	-1.38	-2.92	-8.87	-3.55	-20.79	99
8	-5.29	-3.24	-3.52	-3.28	-6.88	101
9	9.20	6.73	-0.71	4.84	-13.31	108
10	10.56	22.08	45.64	28.48	91.67	114
11	-2.68	-0.76	4.29	5.60	31.37	118
12	11.55	25.38	47.89	29.37	93.32	121
13	-6.48	-8.57	-15.38	-7.89	-29.49	124
14	-5.06	-8.19	-17.02	-7.40	-26.94	125
15	0.56	-4.43	-17.83	-11.04	-35.29	126
16	14.99	22.11	42.44	31.21	103.30	130
17	17.27	25.84	44.40	32.94	89.83	131

Todos os ângulos em [graus] na referência do ângulo do COI.

θ^{ex} calculado em 23 passos, (18+5); $t_{ex} = 0.30672$ s.

θ^{s2} calculado em 03 iterações Newton-Raphson ($F = 1.892D - 13$).

θ^u calculado em 10 iterações Newton-Raphson ($F = 1.545D - 11$).

Com o critério das tensões terminais, as máquinas críticas são as máquinas 5 e 6. Usando o critério $\theta_i^u > \theta_L = 90^\circ$, são cinco máquinas críticas: 5, 6, 10, 12 e 16. Várias simulações no domínio do tempo confirmaram que as máquinas críticas são as máquinas 5 e 6.

Sistema IEEE50

O caso base desse sistema será simulado com um curto-circuito trifásico nas proximidades da barra 7 sendo eliminado desligando-se a linha 6-7*. No caso base as potências dos geradores das barras 93 e 110 são iguais a 700 MW cada. Os resultados do cálculo dos pontos de equilíbrio estão mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Sistema IEEE50 caso base, pontos de equilíbrio para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado com desligamento da linha 6-7* em $t_{cl} = 0.1080$ s.

Gerador No.	θ^{s1}	θ^{cl}	θ^{ex}	θ^{s2}	θ^u	Barra No.
1	13.32	14.56	19.26	15.33	54.84	60
2	18.73	20.04	27.31	28.36	86.80	67
3	17.23	20.13	34.07	21.03	79.88	79
4	18.63	21.21	34.61	22.35	80.34	80
5	11.08	12.74	21.55	15.97	76.33	82
6	31.78	35.24	54.72	36.92	109.14	89
7	25.53	26.39	32.62	28.04	73.75	90
8	14.34	17.33	29.38	19.41	82.90	91
9	17.01	17.73	23.43	21.47	89.92	93
10	22.82	23.17	26.77	24.79	64.44	94
11	42.85	42.98	44.31	43.33	65.90	95
12	15.90	19.09	35.93	21.27	90.73	96
13	21.90	23.42	32.08	31.99	93.01	97
14	35.66	39.99	62.66	41.40	114.73	98
15	24.29	25.72	34.50	29.40	98.70	99
16	22.85	25.85	43.12	27.97	98.81	100
17	17.35	21.33	40.96	23.23	94.24	101
18	19.40	19.90	22.42	24.40	44.85	102
19	19.80	21.70	35.33	24.74	94.94	103
20	36.65	52.99	152.71	66.99	185.43	104
21	24.47	27.35	44.13	30.08	101.87	105
22	24.81	27.64	44.17	30.39	101.94	106
23	6.86	7.55	11.86	11.54	63.60	108
24	-0.83	-0.05	7.19	3.91	63.36	109
25	17.35	18.06	23.60	22.28	90.57	110
26	30.99	39.97	86.52	52.74	157.41	111
27	16.85	20.69	39.93	22.71	93.62	112
28	-2.35	-2.57	-3.86	-1.94	-2.99	115
29	-3.60	-3.83	-4.83	-1.75	3.23	116
30	-2.76	-2.95	-2.64	0.44	11.07	117
31	-4.35	-4.56	-5.21	-1.99	5.38	118
32	-48.26	-48.51	-49.88	-46.57	-35.72	119
33	-7.36	-7.58	-6.61	-2.74	39.01	121
34	12.43	12.42	14.27	18.92	63.18	122
35	11.17	11.81	17.55	19.87	74.13	124
36	-28.84	-29.07	-30.46	-26.63	-10.31	128
37	-38.71	-38.94	-40.37	-37.57	-30.75	130
38	-12.67	-12.90	-14.30	-11.93	-8.23	131
39	5.51	5.31	4.47	7.64	19.81	132
40	2.53	2.30	0.87	1.32	-6.95	134
41	41.42	41.20	39.84	39.96	31.31	135
42	17.05	16.83	15.40	15.64	6.30	136
43	-60.16	-60.39	-61.81	-63.72	-87.62	137
44	2.57	2.34	0.91	0.67	-11.67	139
45	-12.47	-12.69	-14.12	-15.00	-31.06	140
46	2.98	2.75	1.34	2.53	-2.09	141
47	2.54	2.31	0.92	2.82	2.68	142
48	2.70	2.48	1.24	3.99	8.32	143
49	4.18	3.95	2.53	4.32	4.03	144
50	27.53	27.31	25.88	25.93	15.33	145

Todos os ângulos em [graus] na referência do ângulo do COI.
 θ^{ex} calculado em 14 passos, (10 + 4); $t_{ex} = 0.28795$ s.
 θ^{s2} calculado em 3 iterações Newton-Raphson ($F = 2.658D - 11$).
 θ^u calculado em 4 iterações Newton-Raphson ($F = 4.833D - 08$).

O número de iterações para calcular o UEP de controle é pequeno neste caso. O cálculo do SEP novamente não representou problemas maiores para o método Newton-Raphson. Foram escolhidas como máquinas críticas os geradores números 20 e 26. O UEP de controle é um pouco diferente daquele de [CHIA93], porém as máquinas críticas são as mesmas: 20 e 26.

C. MARGEM DE ENERGIA TRANSITÓRIA

A margem de energia ΔV (ou *MET*) é a diferença entre a energia crítica e a energia transitória de perturbação no instante t_{cl} imediatamente anterior à sua eliminação. A equação (3.65) descreve a expressão correspondente, sendo necessário o cálculo prévio do UEP de controle θ^u , bem como a determinação da trajetória $(\theta^{cl}, \omega^{cl})$ no instante de eliminação da perturbação para calcular a margem ΔV . A informação fornecida pela MET é valiosa pois não somente define a estabilidade ou instabilidade transitória do sistema como também fornece um índice qualitativo; além disso quando é normalizada (ΔV_n) em relação à energia cinética corrigida, possibilita o uso em seleção dinâmica de contingências para análise de segurança dinâmica. Ou seja, a normalização viabiliza a eventual comparação de várias margens para diferentes cenários e perturbações, indicando quais as perturbações mais severas. Valores grandes de ΔV_n indicam que o sistema suporta melhor o impacto de perturbação em casos estáveis. Em caso de instabilidade, os valores negativos de ΔV_n também desempenham o mesmo papel, quanto maior o valor negativo mais instável será o sistema para essa perturbação. Na construção de uma lista de contingências é comum fixar um valor arbitrário do tempo de eliminação t_{cl} para servir como referência na normalização da energia transitória.

Na Figura 3.10 é apresentada a curva da margem de energia normalizada do sistema WSCC4, para diferentes valores de tempos de eliminação t_{cl} , quando o sistema é submetido a um curto-circuito na barra 10 com posterior eliminação do ramo 8-10*. O tempo crítico é o tempo em que a margem de energia passa por zero, portanto $t_{cr} = 0.153$ s para a presente perturbação. A curva ΔV_n apresenta um mínimo local, o qual pode ser considerado como o limite inferior da curva da margem de energia a fim de evitar possíveis avaliações errôneas da estabilidade quando os tempos de eliminação forem maiores que o instante em que ΔV_n é mínimo.

Várias margens de energia transitória normalizadas foram calculadas para o sistema IEEE17, considerando uma perturbação originada pela aplicação de um curto-circuito na barra 26, posteriormente eliminado no instante t_{cl} em que se desliga a linha 25-26*. Os resultados das diversas simulações estão ilustrados na curva da Figura 3.11 que representa as margens de energia vs. o tempo de eliminação. No intervalo $0.10 \leq t_{cl} \leq 0.4$, a margem ΔV_n varia entre um valor máximo inicial de 4.12 pu até um valor final de -0.39 pu, sendo o mínimo local igual a -1.18 pu.

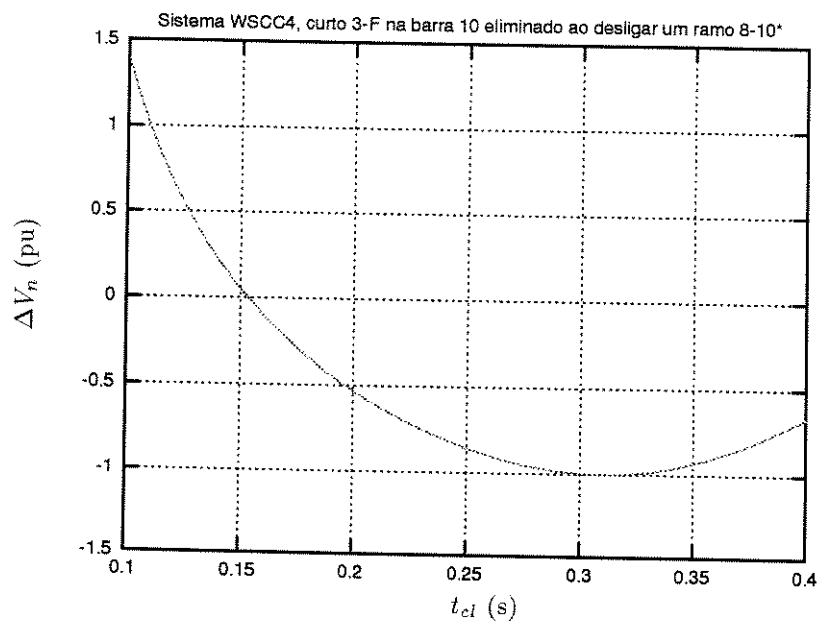


Figura 3.10: Sistema WSCC4. Tempo de eliminação t_{cl} vs. Margem de energia transitória normalizada.

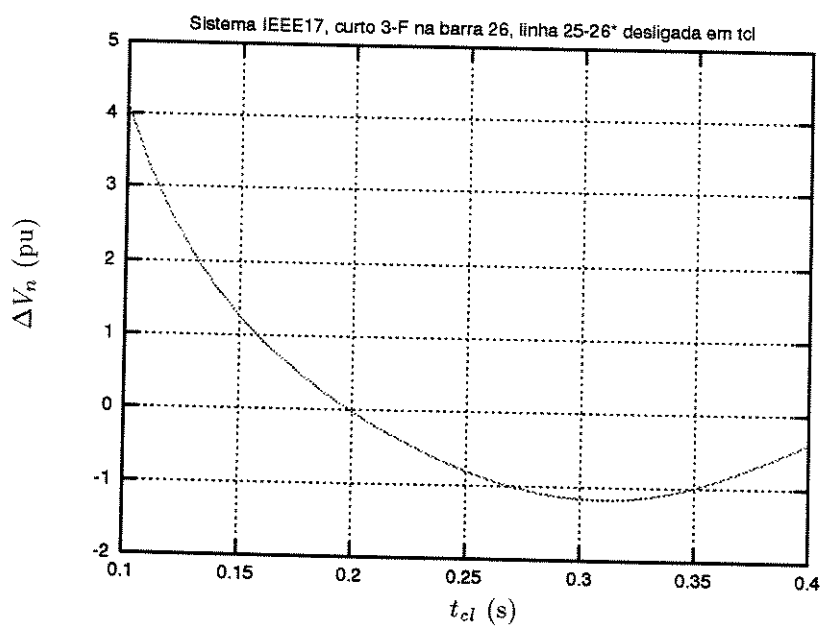


Figura 3.11: Sistema IEEE17. Tempo de eliminação t_{cl} vs. Margem de energia transitória normalizada.

3.7 Comportamento da Energia Transitória nas Proximidades do Tempo Crítico

A energia transitória do sistema perturbado nas proximidades do tempo crítico de eliminação pode apresentar um comportamento particular tanto para os sistemas com ou sem amortecimento. O acompanhamento da evolução da energia transitória utilizando passos de integração numérica relativamente pequenos permite a investigação de algumas dessas particularidades ao redor do tempo crítico. É importante conhecer em detalhes tal comportamento pois, como será visto no capítulo 4, a detecção do ponto de saída pode ser feita determinando-se o instante em que a energia potencial atinge seu primeiro máximo. Deve-se ressaltar que os resultados apresentados nesta seção são inéditos, não tendo sido relatados na literatura.

Estudos realizados com o sistema ABIAD4 nos casos com e sem amortecimento serão mostrados com a finalidade de caracterizar a evolução da energia transitória nas proximidades do tempo crítico. A perturbação consiste em um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado sem desligamento de linha. Se o tempo de eliminação é claramente menor que o tempo crítico, a energia transitória V aumenta até o instante de eliminação, logo após ela ainda se mantém por alguns instantes no seu valor máximo (aproximadamente da mesma magnitude que a energia crítica V_{cr}) e depois o amortecimento uniforme do sistema faz com que a magnitude da oscilação da energia transitória comece a diminuir e possa voltar a zero no tempo infinito (na prática é um tempo longo). Essa evolução da energia transitória é característica dos sistemas estáveis com amortecimento uniforme, apenas varia a magnitude da energia transitória V no instante de eliminação da perturbação; o valor da energia V no instante t_{cl} é menor que V_{cr} , como era de se esperar. A Figura 3.12 ilustra o caso descrito em que $t_{cl} = 0.4620$ s e a energia crítica é $V_{cr} = 2.1026$ pu. Na Figura 3.13 apresenta-se a simulação no tempo da energia transitória quando $t_{cl} = 0.4621$ s, ou seja, foi apenas acrescentado um valor muito pequeno. Para esse t_{cl} o sistema resultou instável, embora até os 2 segundos a energia transitória V se mantivesse com uma magnitude similar à energia crítica; porém o amortecimento não conseguiu manter essa condição e o sistema tornou-se instável. A energia cinética não aumentou indefinidamente, pois apesar de ser oscilatória mantém um valor médio quase constante a partir dos 8 segundos; já a energia potencial diminui juntamente com o valor da energia transitória.

Era de se esperar que conforme aumentasse t_{cl} o comportamento do sistema mantivesse a característica dos sistemas estáveis mostrada na Figura 3.13; porém ao considerar um $t_{cl} = 0.4622$ s, a energia transitória apresentou uma evolução assintótica e sem chegar à instabilidade. Isso pode ser ilustrado com a simulação mostrada na Figura 3.14, em que a energia transitória depois de atingir um valor comparável a energia crítica, começa a diminuir mas chega a atenuar-se em aproximadamente 4.7 pu e se mantém constante nesse valor a partir dos 11 segundos. Tanto a energia cinética como a energia potencial mostram uma evolução assintótica. O sistema apresenta uma energia negativa no regime permanente de pós-perturbação, porém constante. Uma possível ressonância parece ter originado esse comportamento assintótico de V para o sistema de teste com amortecimento uniforme. Aproximadamente a partir de $t_{cl} > 0.45$ s o sistema volta a apresentar a evolução típica dos sistemas estáveis, dado pela saída mostrada na Figura 3.13.

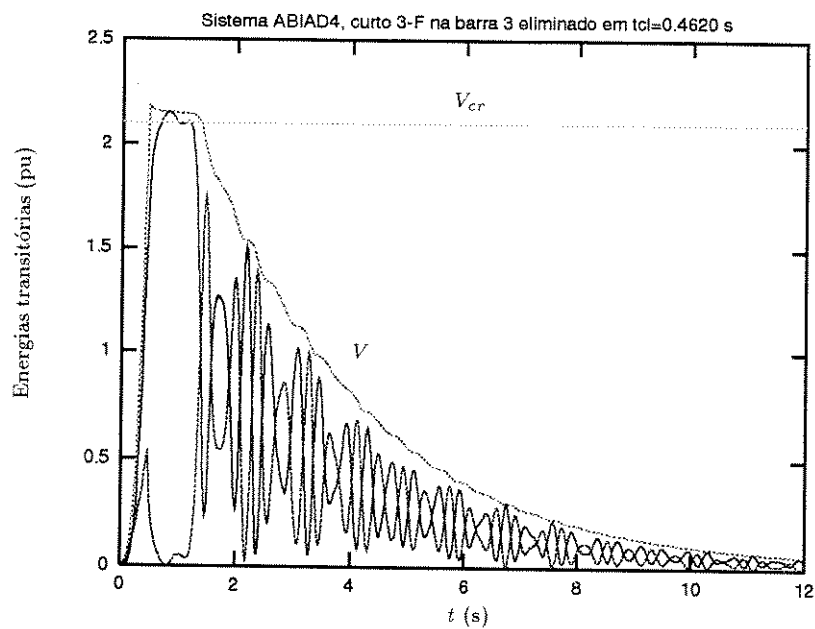


Figura 3.12: Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso marginalmente estável.

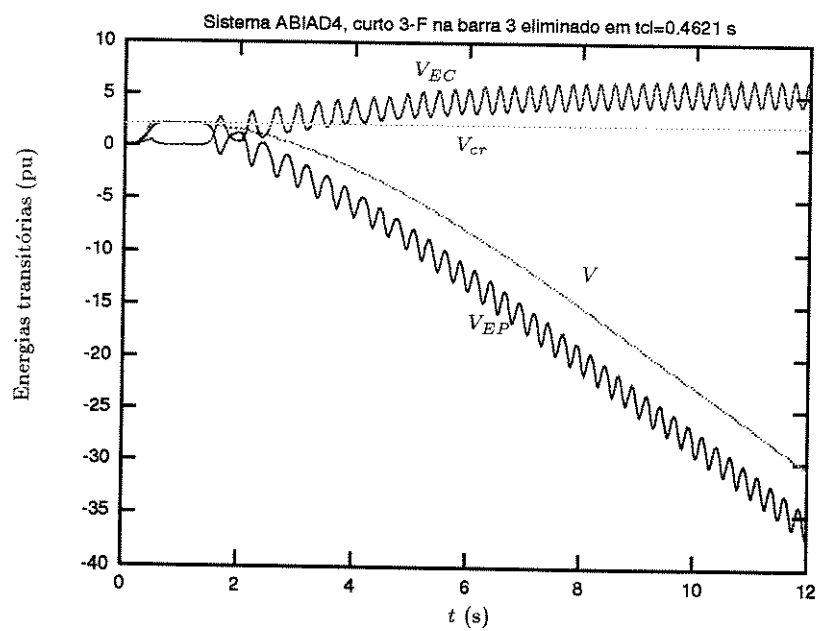


Figura 3.13: Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso marginalmente instável.

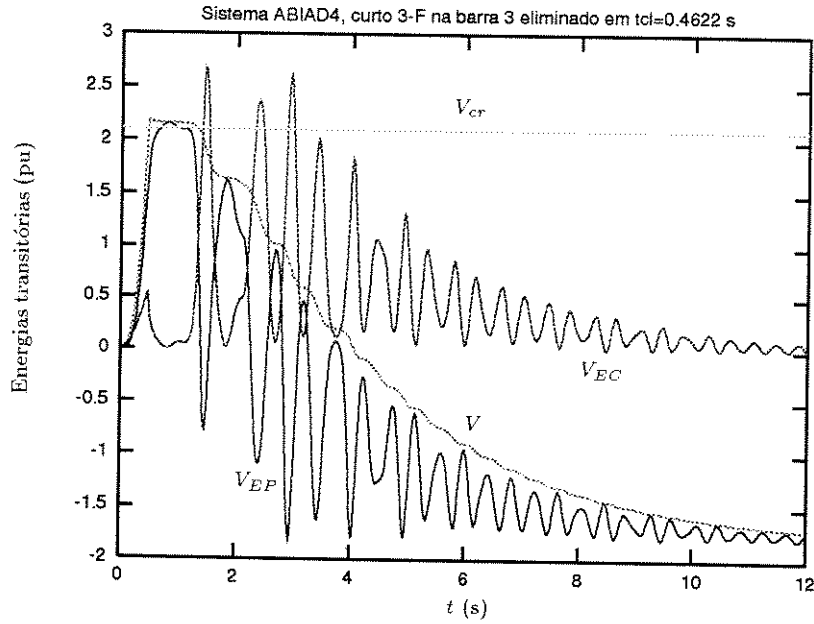


Figura 3.14: Sistema ABIAD4 com amortecimento uniforme. Componentes da função de energia, caso marginalmente instável mostrando “ressonância”.

Anteriormente foi visto que os sistemas sem amortecimento apresentam uma energia transitória de pós-perturbação quase constante, sendo essa consideração válida nos seguintes testes realizados no sistema WSCC4 de 4 geradores, sem amortecimento. A perturbação a ser simulada é originada por um curto-circuito na barra 10, a perturbação é eliminada desligando um dos dois ramos 8-10. , Foram realizadas muitas simulações na tentativa de descobrir a fonte dos fenômenos de ressonância detectada nos testes anteriores. Uma possibilidade é que a ressonância se devesse à segunda oscilação. Nas Figuras 3.15 e 3.16 são apresentadas as curvas t_{cl} vs. $V_{EP_{max}}$, ou seja, o tempo de eliminação da contingência vs. o valor máximo da energia potencial para um t_{cl} dado. Segundo a curva da Figura 3.15, a energia potencial máxima aumenta conforme aumenta o tempo t_{cl} até atingir um valor máximo $V_{EP_{max}} = 0.701$ pu (quando $t_{cl} = 0.165$ s), logo depois começa a diminuir até alcançar um valor assintótico constante $V_{EP_{max}} = 0.632$ pu quando t_{cl} é muito grande. A obtenção da $V_{EP_{max}}$ no método PEBS [KAKI78a, KAKI78b] é feita através de simulação do sistema sob uma perturbação sustentada, o que equivale a considerar um t_{cl} grande. A curva da Figura 3.15 mostra que esse não é o máximo maximorum, mas sim um valor aproximado.

Simulações mais rigorosas possibilitaram construir a curva na Figura 3.16 que é uma ampliação da Figura 3.15. Conforme é mostrado, o primeiro máximo dos $V_{EP_{max}}$ é de 0.6953 pu e verifica-se quando $t_{cl} = 0.15788$ s. Ao comparar as duas curvas observa-se que se não for utilizado um passo de integração adequado (pequeno) não será possível observar a ressonância na curva dos máximos da energia potencial.

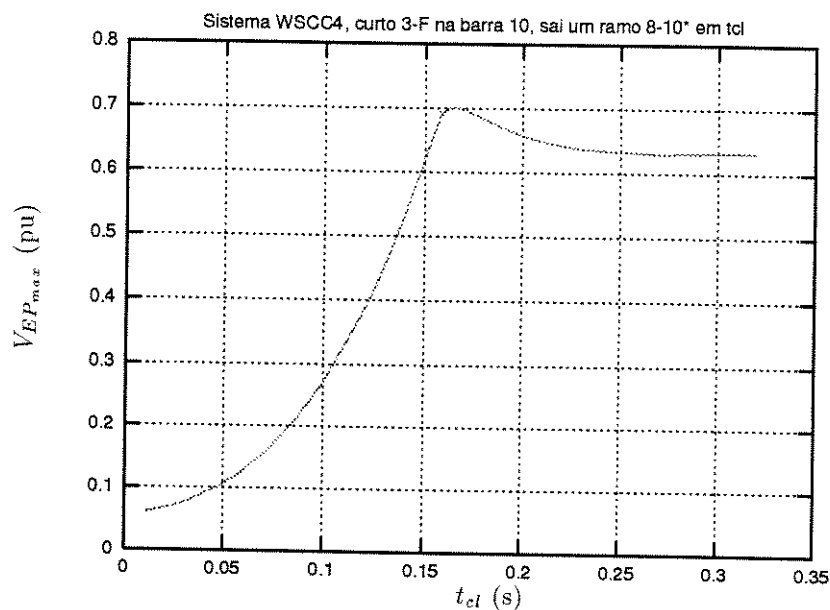


Figura 3.15: Sistema WSCC4, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. máxima energia potencial, mostrando comportamento final quase constante de $V_{EP_{max}}$.

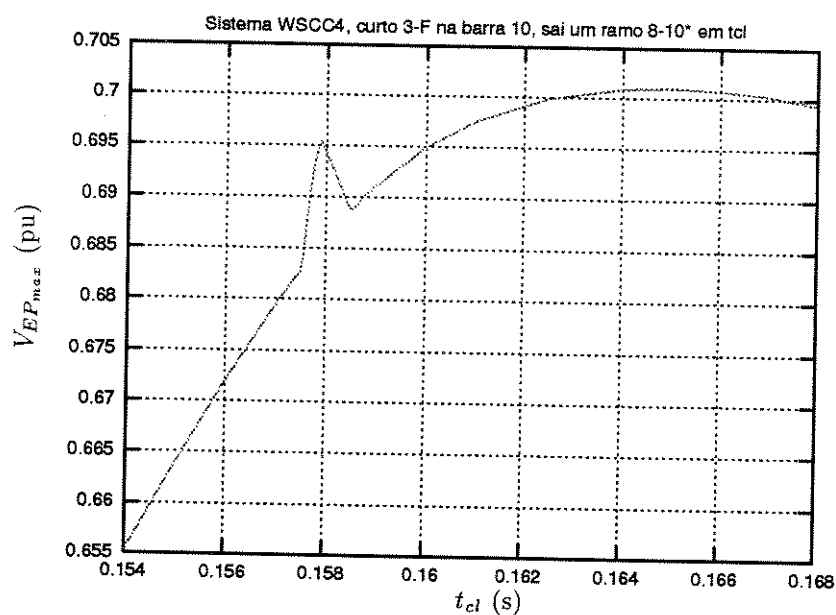


Figura 3.16: Sistema WSCC4, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. máxima energia potencial, mostrando “ressonância” de $V_{EP_{max}}$.

Essa “ponta” da curva na Figura 3.16 representa o primeiro máximo das energias potenciais máximas simuladas para vários t_{cl} . Coincidentemente, o tempo $t_{cl} = 0.15788$ s corresponde ao verdadeiro tempo crítico de eliminação, obtido mediante simulação convencional no domínio do tempo. Portanto, um critério para calcular o tempo crítico consiste na determinação do primeiro valor máximo das energias potenciais máximas obtidas para diferentes tempos de eliminação. Desse modo, o critério estabelece que o tempo crítico corresponde ao instante em que a energia potencial alcança seu primeiro máximo.

Na Figura 3.17 são dadas as curvas do tempo de eliminação vs. tempos em que acontecem a energia potencial máxima e primeira energia potencial máxima. Para ambas as curvas pode-se observar que o tempo crítico corresponde ao instante t_{cl} que origina o maior valor de $V_{EP_{max}}$ e $V_{EP_{max1}}$. A ressonância novamente é verificada com os valores do tempo em que $V_{EP_{max}}$ alcança seu maior valor, no instante t_{cr} .

Outras simulações com o sistema de teste IEEE50, considerando um curto-circuito aplicado na barra 7 e eliminado com desligamento da linha 6-7*, são mostradas nas Figuras 3.18 e 3.19. Os resultados confirmam a ocorrência da ressonância no valor da energia potencial máxima nas proximidades do tempo crítico. O tempo crítico corresponde a $t_{cl} = 0.10767$ s, que originou a primeira energia potencial máxima $V_{EP_{max}} = 6.1291$ pu, que nesse caso aliás resultou ser a maior $V_{EP_{max}}$. Baseado nesses testes, conclui-se que o critério de usar uma perturbação sustentada não garante a obtenção da verdadeira primeira energia potencial máxima.

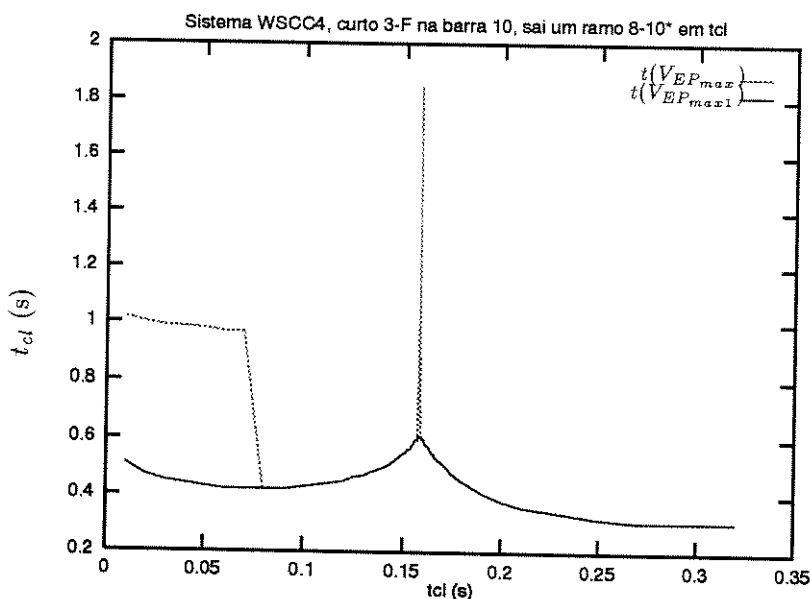


Figura 3.17: Sistema WSCC4, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. tempos de ocorrência da máxima energia potencial e da primeira máxima energia potencial, mostrando “ressonância”.

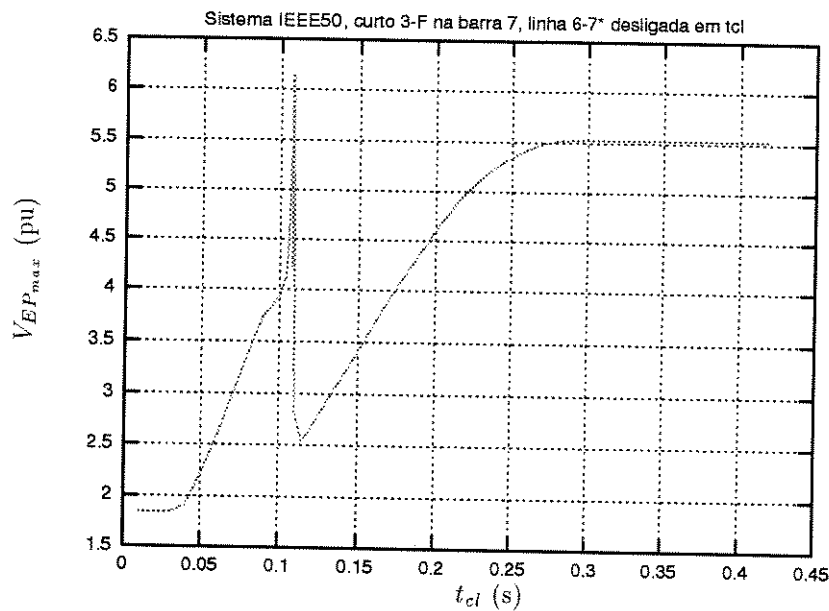


Figura 3.18: Sistema IEEE50, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. máxima energia potencial.

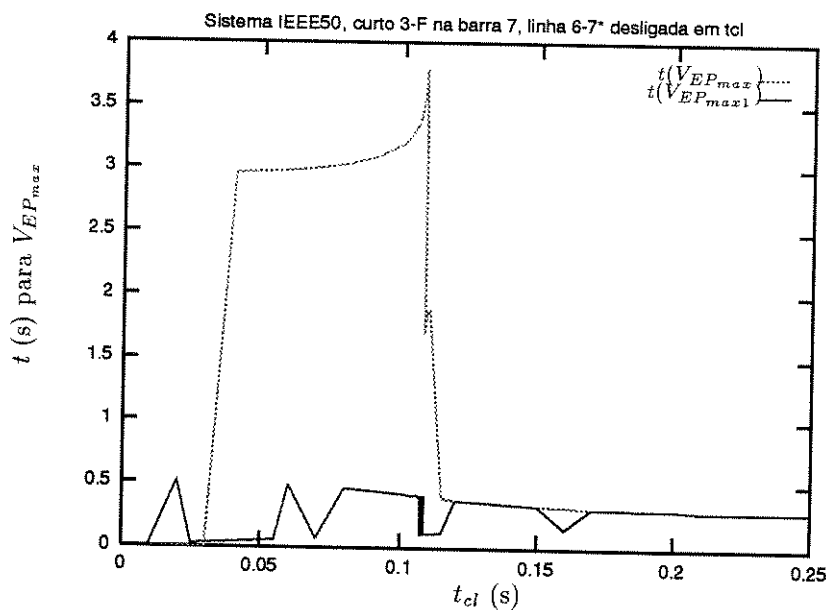


Figura 3.19: Sistema IEEE50, caso 1. Tempo de eliminação t_{cl} vs. tempo de ocorrência da energia potencial máxima.

3.8 Cálculo do Tempo Crítico Usando o Critério da Máxima Energia Potencial

Existem várias alternativas para determinar o tempo crítico de eliminação de uma perturbação. Os métodos TEF consideram um procedimento de dois passos: primeiro calculam o valor da energia crítica definida, por exemplo, no ponto de equilíbrio instável de controle; o segundo passo consiste na identificação do instante de tempo em que a energia transitória é igual à energia crítica; esse é o tempo crítico, tal como foi estudado na seção 3.5.

Outro procedimento para estimar t_{cr} deve-se a Kakimoto et.al. [KAKI78a, KAKI78b] e consiste na utilização da derivada de energia potencial, segundo o algoritmo (conforme discussão de Iwamoto ao artigo [TOUM86]) dado por:

Passo 1. Construir a função de energia $V(\theta, \tilde{\omega}) = V_{EC}(\tilde{\omega}) + V_{EP}(\theta)$

Passo 2. Integrar o sistema sob perturbação até o instante t^* em que: $\frac{d V_{EP}(\theta)}{dt} = 0$

Passo 3. Definir como a energia crítica o valor da energia potencial no instante t^* , ou seja, $V_{cr} = V_{EP}(\theta(t^*))$

Passo 4. Estimar o tempo crítico t_{cr} como sendo o tempo em que $V(\theta, \tilde{\omega}) = V_{cr}$.

A metodologia original de Kakimoto e outros utiliza uma função de Lyapunov tipo Lur'e. Neste trabalho tal metodologia foi modificada a fim de incluir o conceito da função de energia, bem como a energia cinética corrigida. Também é possível a inclusão do critério da energia potencial máxima, mostrada na seção prévia, apesar de que para aplicações práticas e rápidas não seja computacionalmente eficiente.

A aplicação do método de Kakimoto ao sistema WSCC4 é mostrada na Figura 3.20, onde se pode observar que o valor da energia potencial máxima $V_{EP_{max}} = 0.6323$ pu, em $t = 0.31$ s. Isso equivale a igualar a zero a derivada da energia potencial. Então é traçada uma reta até intersectar a curva $V(\tilde{\omega}, \theta)$ que corresponde ao valor da energia transitória crítica obtida no instante $t_{cr} = 0.1515$ s. Esse valor de t_{cr} é muito próximo de 0.1525 s, que foi o tempo crítico calculado segundo o algoritmo da seção 3.5.

Outro teste foi conduzido utilizando o sistema IEEE17 de 17 geradores e 162 barras, onde a contingência analisada é um curto-circuito trifásico na barra 75, eliminado mediante o desligamento da linha 75-9. O cálculo aproximado do tempo crítico teve os seguintes resultados: $V_{EP_{max}} = 26.35$ pu obtida em $t = 0.52$ s, e o tempo crítico $t_{cr} = 0.3541$ s. Essa perturbação também foi analisada em [IEEE92] onde o tempo crítico relatado se encontra entre 0.354 s e 0.355 s.

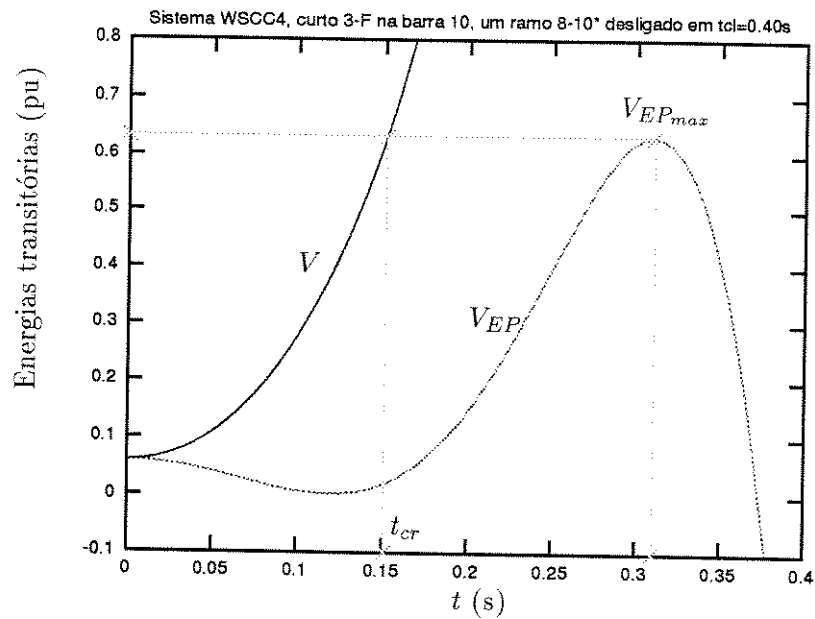


Figura 3.20: Sistema WSCC4. Cálculo do tempo crítico usando como critério $V_{EP_{max}} = V(\theta, \tilde{\omega})$.

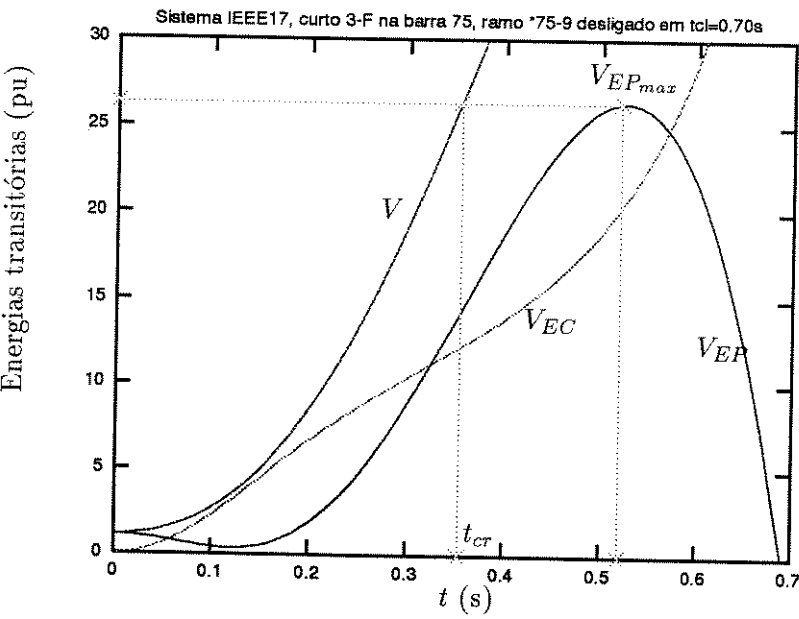


Figura 3.21: Sistema IEEE17. Cálculo aproximado do tempo crítico usando como critério $V_{EP_{max}} = V(\theta, \tilde{\omega})$.

Os resultados obtidos para os tempos críticos dos sistemas WSCC4 e IEEE17, utilizando o método de Kakimoto, podem ser considerados satisfatórios. Porém, quando o método é aplicado ao sistema IEEE50 de 50 geradores a estimativa do tempo crítico não é muito precisa. A Figura 3.22 ilustra a obtenção do tempo crítico $t_{cr} = 0.0815$ s, calculado a partir da energia potencial máxima $V_{EP_{max}} = 5.5252$ pu (quando $t = 0.2862$ s) do sistema sob perturbação. Introduzindo o conceito de energia cinética corrigida para o cálculo da energia transitória observa-se que a estimativa de t_{cr} melhora para 0.09 s, bem mais próximo do valor real do tempo crítico que é $t_{cr} = 0.108$ s. Para o cálculo da energia cinética corrigida é necessário o conhecimento das máquinas críticas, normalmente determinadas depois de se calcular o UEP de controle; contudo isso não foi necessário porque alternativamente foi usado o critério de declarar como máquinas críticas àquelas que tem uma tensão terminal de pré-perturbação menor que 0.8 pu. Se além disso tivesse sido levada em consideração a energia potencial máxima no instante da ressonância ($V_{EP_{max}} = 6.1291$ pu), estudada anteriormente, o tempo crítico teria sido estimado com maior precisão resultando praticamente em $t_{cr} = 0.1$ s.

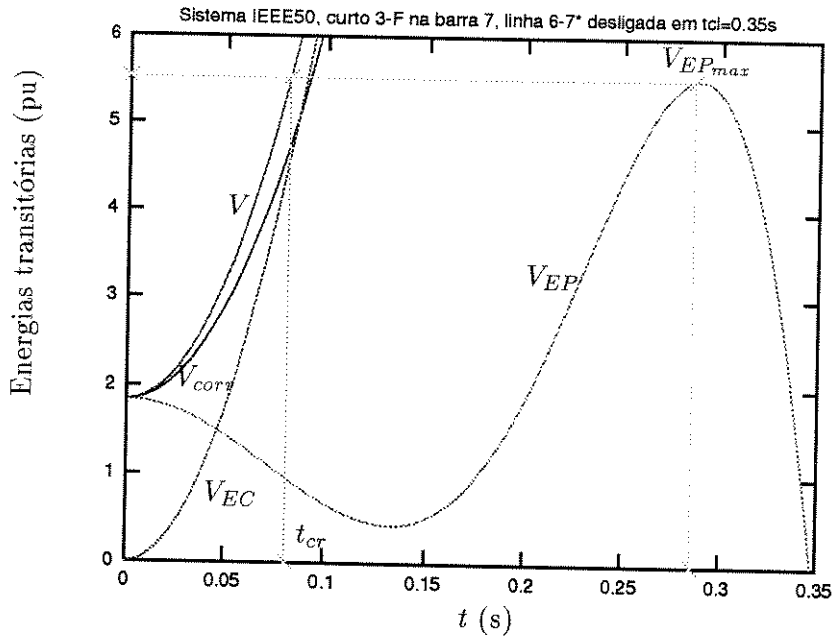


Figura 3.22: Sistema IEEE50, caso 1. Cálculo do tempo crítico usando como critério $V_{EP_{max}} = V(\theta, \tilde{\omega})$.

Capítulo 4

A Região de Estabilidade e o Cálculo do Ponto de Equilíbrio Instável de Controle

Antes de o estado de equilíbrio perder a sua estabilidade, o domínio de atração torna-se muito pequeno, e uma perturbação aleatória sempre poderá jogar o sistema desse domínio para outro, até mesmo antes que o domínio de atração tenha desaparecido por completo.

[V.I. Arnold]

The task to find the controlling u.e.p. relative to a fault is in general very difficult. Very few publications have listed the coordinate of the controlling u.e.p. relative to a fault. Even the IEEE task force on the direct methods does not publish the controlling u.e.p. for the test cases.

[H.D. Chiang]

4.1 Introdução

A obtenção do ponto de equilíbrio instável de controle é um passo fundamental nos métodos da função de energia transitória que procuram precisão na determinação da energia crítica (V_{cr}) e com isso evitar estimativas errôneas da estabilidade transitória [FOUA81c, FOUA84, CHIA95a]. Lembre-se que o índice de estabilidade transitória fornecido pelos métodos TEF é a margem de energia transitória (MET), que é função da energia crítica V_{cr} , que por sua vez depende do ponto de equilíbrio instável de controle.

Apesar dos métodos numéricos para o cálculo dos pontos de equilíbrio de um sistema dinâmico serem gerais e independentem dos sistemas físicos em que são aplicados, no estudo dos sistemas de potência reais surgem complicações adicionais tais como a grande dimensão e a complexidade dos fenômenos dinâmicos verificados durante o período transitório.

Para resolver o problema da estabilidade transitória com métodos TEF devem ser calculados os pontos de equilíbrio estáveis e principalmente os pontos de equilíbrio instáveis. O problema geral de cálculo dos pontos de equilíbrio é simples de ser formulado, pois deseja-se obter os pontos em que a função de aceleração do sistema pós-falta é nula; portanto toda solução de $f(\theta) = 0$ é um ponto de equilíbrio. Matematicamente o problema corresponde a resolver um sistema de equações algébricas não-lineares. Não obstante, devem ser observadas condicionantes específicas tais como: o método numérico utilizado, a inicialização usada; as condições de operação do sistema elétrico em um instante de tempo dado; e as topologias do sistema pré-falta, sob falta e pós-falta. Na literatura tem sido documentado que há poucas dificuldades no cálculo dos pontos de equilíbrio estáveis pós-falta [FOUA92, CHIA95b, TREI96], onde mesmo os métodos menos confiáveis conseguem chegar na maioria das vezes às soluções razoáveis. Esse fato também foi verificado neste trabalho.

Já a determinação dos pontos de equilíbrio instáveis está longe de significar a solução de um problema simples, pois os métodos numéricos de cálculo às vezes divergem e em outros casos podem ser calculados pontos de equilíbrio errados [TREI96, FOUA92, PAVE94]. Por essa razão continua-se pesquisando na busca de métodos mais eficientes e robustos que os métodos existentes na literatura. Geralmente os métodos de cálculo de pontos de equilíbrio falham na determinação do ponto de equilíbrio instável de controle (UEP relevante) para uma trajetória sob falta previamente especificada. Quando o sistema de potência é de grande porte e opera sob situação de estresse, o cálculo do UEP de controle é mais difícil [FOUA92, CHIA94, TREI96].

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos matemáticos dos métodos TEF com base nos recentes desenvolvimentos documentados na literatura [CHIA87, CHIA88a, CHIA88b, ZABO88, CHIA94, CHIA95b], que utilizam conceitos da teoria de sistemas dinâmicos não-lineares para a definição da região de atração ou domínio de estabilidade, do limite de estabilidade, e do comportamento da trajetória na superfície de energia potencial.

Logo após, trata-se dos métodos computacionais para o cálculo do ponto de equilíbrio instável de controle, e então é formulada a proposta de uma nova metodologia geral de dois passos para a determinação do UEP de controle. O primeiro passo consiste na detecção do ponto de saída usando um novo procedimento algorítmico, mais rápido e eficiente que os existentes. Para realizar o segundo passo, que consiste no cálculo numérico exato do UEP de controle partindo diretamente do ponto de saída, serão investigados os seguintes métodos: a) uma versão modificada do método Newton-Raphson, mais eficiente e robusto; b) método BFGS de otimização não-linear; c) uma combinação dos dois.

Diversos testes de aplicação possibilitarão validar as qualidades e vantagens da metodologia proposta para a solução final do ponto de equilíbrio instável de controle, com ênfase nos sistemas de potência de grande porte que operam sob estresse. Para a realização dos testes utilizou-se o programa *Transtef* desenvolvido pelo autor durante esta pesquisa (ver Apêndice C).

4.2 Caracterização Matemática dos Pontos de Equilíbrio

Os sistemas elétricos de potência podem ser considerados sistemas dinâmicos não-lineares. Portanto, a caracterização dos pontos de equilíbrio dos sistemas de energia elétrica, pode ser feita utilizando a teoria e os conceitos dos sistemas dinâmicos não-lineares.

Seja o seguinte sistema dinâmico não-linear,

$$\dot{X}(t) = f(X(t)) \quad (4.1)$$

em que $X(t)$ é um vetor de estado no espaço euclidiano $\mathbb{R}^n$ e a função $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ satisfaz a condição suficiente de existência e unicidade das soluções. Os sistemas da forma (4.1) em que o campo vetorial f não contém explicitamente o tempo são chamados *sistemas autônomos*.

A curva solução do sistema (4.1), que começa em $X(t = 0)$, é conhecida como *trajetória* ou *órbita* do sistema, e a sua notação é dada por $\Phi(X, \cdot): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$; nota-se que $\Phi(X, 0) = X$. Uma trajetória é uma curva ou *curva integral* no espaço de estados de um sistema dinâmico. A apresentação visual do espaço de estados é o *retrato de fase* do sistema.

Um vetor de estado $\hat{X}$ é chamado um *ponto de equilíbrio*¹ do sistema (4.1) se $f(\hat{X}) = 0$. O conjunto de pontos de equilíbrio do sistema pode ser denotado como Υ . Um vetor de estado X é chamado de *ponto regular* se não é um ponto de equilíbrio.

Um ponto de equilíbrio do sistema dinâmico (4.1) é *hiperbólico* se a matriz jacobiana de $f(\cdot)$ em $\hat{X}$, denotada genericamente por $J_f(X)$, não tem autovalores com parte real zero. Para um certo ponto de equilíbrio hiperbólico, diz-se que é um *ponto de equilíbrio estável* (assintoticamente) se todos os valores próprios da sua jacobiana têm partes reais negativas²; em caso contrário é um *ponto de equilíbrio instável*. Se a matriz jacobiana avaliada no ponto de equilíbrio $\hat{X}$ tem um autovalor com parte real positiva então $\hat{X}$ é um ponto de equilíbrio tipo um. Portanto, $\hat{X}$ chama-se de *ponto de equilíbrio tipo k* se a sua correspondente jacobiana tem k autovalores com parte real positiva. Um ponto de equilíbrio de tipo 0 é chamado uma “bacia” (*sink*), um de tipo n é denominado “fonte” (*source*) e todos os outros são pontos de sela (*saddle*). As bacias são pontos de equilíbrio estáveis enquanto que as fontes e pontos de sela são pontos de equilíbrio instáveis.

Diz-se que o conjunto $M \in \mathbb{R}^n$ é um conjunto invariante do sistema (4.1) se qualquer trajetória começando em M permanece em M para todo tempo t . O conjunto w -limite de uma trajetória captura o comportamento assintótico futuro da trajetória (em tempo positivo), entanto que o

¹Um ponto atrator ou ponto de descanso é um ponto crítico (ponto de equilíbrio, ponto limite) que atrai quase todos os estados iniciais vizinhos [ABRA82].

²O primeiro critério de estabilidade no sentido de Lyapunov estabelece que um sistema dinâmico é estável se seus autovalores têm partes reais negativas; os autovalores com parte real positiva são denominados autovalores *instáveis* [LYAP1892].

conjunto α -limite captura o comportamento assintótico passado da trajetória (em tempo negativo). O conjunto limite de uma trajetória inclui os seus conjuntos α -limite e w -limite. A determinação do conjunto limite de um sistema dinâmico não é uma tarefa fácil.

Uma variedade diferenciável (*manifold*) ou simplesmente *variedade* é um espaço multidimensional com as mesmas propriedades de diferenciação; topologicamente uma variedade é um espaço curvo. As variedades estáveis (*stable manifolds*) e as variedades instáveis (*unstable manifolds*) são conjuntos invariantes. Seja $\hat{X}$ um ponto de equilíbrio hiperbólico, então as suas *variedades estável e instável*, $W^s(\hat{X})$ e $W^u(\hat{X})$, respectivamente, são definidas da seguinte maneira:

$$W^s(\hat{X}) := \{X \in \mathbb{R}^n : \Phi(X, t) \rightarrow \hat{X} \text{ segundo } t \rightarrow \infty\} \quad (4.2)$$

$$W^u(\hat{X}) := \{X \in \mathbb{R}^n : \Phi(X, t) \rightarrow \hat{X} \text{ segundo } t \rightarrow -\infty\} \quad (4.3)$$

A equação (4.2) indica que a variedade estável de um ponto de equilíbrio é o conjunto de estados no espaço n -dimensional tal que a trajetória tende a esse ponto de equilíbrio conforme o tempo aumenta. Analogamente, a equação (4.3) estabelece que a variedade instável de um ponto de equilíbrio é o conjunto de estados no espaço n -dimensional tal que a trajetória tende a esse ponto de equilíbrio conforme o tempo tende a $-\infty$. Em consequência, $\hat{X}$ é o conjunto w -limite de cada ponto em $W^s(\hat{X})$ e $\hat{X}$ é o conjunto α -limite de todo ponto em $W^u(\hat{X})$. Na Figura 4.1 estão ilustradas estas afirmações.

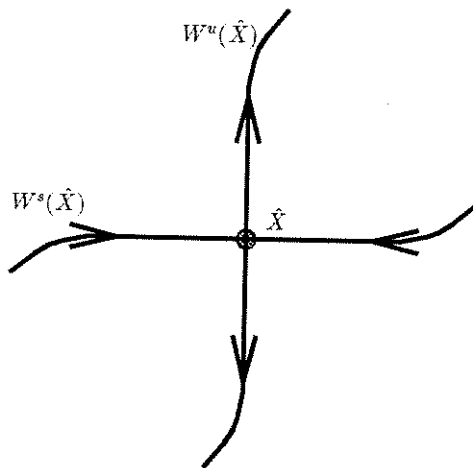


Figura 4.1: Variedades estável e instável de um ponto de equilíbrio.

Dado um ponto de equilíbrio estável assintoticamente, pode ser mostrado que existe um mínimo $\delta > 0$ tal que $\|X_0 - \hat{X}\| < \delta$ implica $\Phi(X_0, t) \rightarrow \hat{X}$ conforme $t \rightarrow \infty$. Se δ for suficientemente grande então $\hat{X}$ é um ponto de equilíbrio estável global.

O conceito de transversalidade é fundamental para o estudo dos sistemas dinâmicos. Dadas as variedades A e B submersas injetivamente (*injectively*) no espaço de estados M , elas satisfazem a condição de transversalidade se :

- a) em cada ponto de intersecção $X \in A \cap B$, os espaços tangentes de A e B atravessam o espaço tangente de M em X , isto é,

$$T_x(A) \oplus T_x(B) = T_x(M) \quad \text{para } x \in A \cap B \quad (4.4)$$

ou,

- b) elas não se intersecam.

A intersecção transversal persiste sob perturbação do campo vetorial f .

A região de estabilidade ou *região de atração* de um ponto de equilíbrio estável X_s é o conjunto de estados no espaço n -dimensional tal que o limite da sua trajetória, conforme o tempo aumenta, é igual a X_s . A seguinte expressão define a região de estabilidade de X_s ,

$$A(X_s) := \left\{ X \in \mathbb{R}^n : \lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(X, t) = X_s \right\} \quad (4.5)$$

Topologicamente a região de estabilidade $A(X_s)$ é um conjunto aberto ³, invariante e conexo.

A fronteira ou limite da região de estabilidade chama-se *limite de estabilidade* ou separatriz de X_s e será denotado por $\partial A(X_s)$. Topologicamente esse limite de estabilidade é um conjunto invariante e fechado ⁴ de dimensão $(n - 1)$ e é definido por,

$$\partial A(X_s) = \bigcup_{X_i \in EB} W^s(X_i) \quad (4.6)$$

sendo $W^s(X_i)$ a variedade estável do ponto de equilíbrio instável X_i localizado no limite de estabilidade do ponto de equilíbrio estável X_s ; EB é o conjunto dos pontos de equilíbrio que se encontram no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$. Na Figura 4.2 são mostrados a região de estabilidade e o limite de estabilidade correspondentes a um ponto de equilíbrio estável de um hipotético sistema dinâmico; claramente é observado que as trajetórias contidas na região de estabilidade são atraídas pelo ponto X_s à medida que o tempo aumenta, sendo portanto trajetórias estáveis assintoticamente.

³Um conjunto A é chamado *aberto* se para cada $X \in A$ há um $\epsilon > 0$ tal que uma função $d(x, y) < \epsilon$ implica que $y \in A$ [GUCK83].

⁴Um conjunto A é fechado se contém todos seus pontos limites [GUCK83].

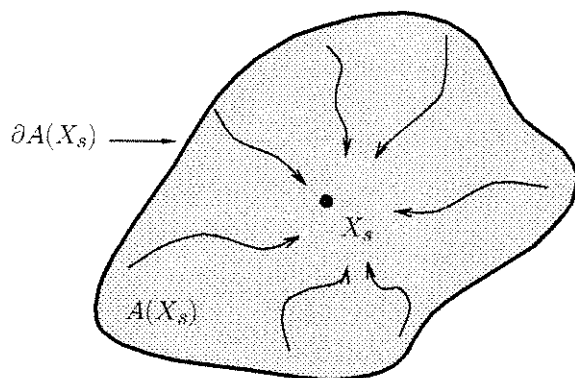


Figura 4.2: Região de estabilidade $A(X_s)$ e limite de estabilidade $\partial A(X_s)$ de um ponto de equilíbrio estável X_s .

Na Figura 4.3 é mostrado um caso em que a condição de transversalidade não é satisfeita, dadas as variedades estáveis e instáveis dos elementos críticos x_1 e x_2 na região de atração do ponto de equilíbrio estável x_s .

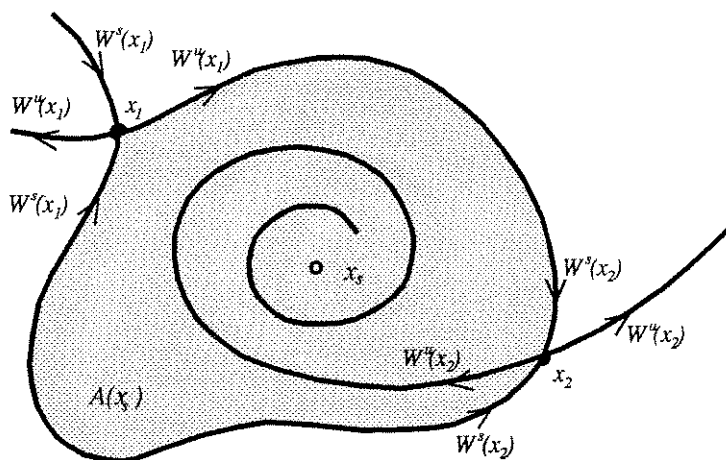


Figura 4.3: Condições de transversalidade não satisfeitas pelas variedades estável e instável dos elementos críticos x_1 e x_2 do domínio de atração do elemento estável x_s .

Ainda não foram desenvolvidas expressões analíticas para calcular as variedades estáveis e instáveis, conseqüentemente a determinação do limite de estabilidade é praticamente impossível, porém a adoção de uma função de energia viabiliza uma forma simples de estimar limites e regiões de estabilidade para sistemas de potência da forma (4.1). O método da função de energia, de dimensão n , consiste em utilizar a inversa da função de energia, de dimensão $n - 1$, em um valor particular, a fim de aproximar o limite de estabilidade que também é de dimensão $n - 1$.

O conceito de superfície constante da função de energia será definida a seguir porque guarda uma relação importante com o limite de estabilidade. Seja o seguinte conjunto,

$$S_V(L) = \{X \in \mathbb{R}^n : V(X) < L\} = \bigcup_{i=1..m} S_V^i(L) \quad (4.7)$$

em que $V(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função de energia; $S_V(L)$, ou simplesmente $S(L)$, é uma região com um valor de energia menor que o escalar L . Cada componente $S^i(L)$ (ou $S_V^i(L)$) é invariante, conexo e disjunto de cada um dos outros componentes.

O limite ou fronteira do conjunto definido por (4.7) é definido como sendo,

$$\partial S_V(L) = \{X \in \mathbb{R}^n : V(X) = L\} \quad (4.8)$$

em que $\partial S_V(L)$ também é chamado *conjunto nível* ou *superfície de energia constante*, sendo L o *valor do nível*. Quase para todos os valores de L , o conjunto nível $\partial S_V(L)$ é uma subvariedade C^r de dimensão $n - 1$. Desde que $V(\cdot)$ é contínuo, $S(L)$ é um conjunto aberto. O conjunto $S(r)$ contém unicamente um componente conexo que tem uma interseção não-vazia com a região de estabilidade $A(X_s)$ se e somente se $r > V(X_s)$.

Se X_s é um ponto de equilíbrio estável do sistema (4.1), todo ponto de equilíbrio $\hat{X}$ no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$ é hiperbólico. Isso equivale a dizer que se $W^u(\hat{X}) \cap A(X_s) \neq \emptyset$, então $\hat{X}$ se encontra no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$. A condição suficiente para que $\hat{X}$ se encontre no limite de estabilidade é a existência de uma trajetória em $W^u(\hat{X})$ que aproxime $\hat{X}$. A condição passa a ser necessária ao levar em conta as seguintes suposições:

- (S1) Todos os pontos de equilíbrio no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$ são hiperbólicos.
- (S2) As variedades estáveis e instáveis dos pontos de equilíbrio localizados no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$ satisfazem a condição de transversalidade.
- (S3) Toda trajetória no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$ aproxima-se de um dos pontos de equilíbrio à medida que o tempo $t \rightarrow \infty$.

A suposição (S1) é uma propriedade genérica dos campos vetoriais C^1 e pode ser verificada numericamente mediante o cálculo dos valores próprios. A suposição (S2) também é uma propriedade genérica, porém é difícil de ser verificada numericamente. A suposição (S3) unicamente é uma propriedade genérica para os sistemas planares; para sistemas de dimensão maior pode ser verificada mediante funções de energia. Se todo ponto de equilíbrio no limite de estabilidade é hiperbólico, então o limite de estabilidade deve conter no mínimo um ponto de equilíbrio tipo 1. Além disso, se o limite de estabilidade é limitado, então ali existe no mínimo uma fonte e um ponto de equilíbrio tipo 1 no limite de estabilidade.

4.3 A Função de Energia e o Ponto de Equilíbrio Instável de Controle

Dada a ocorrência de uma contingência em um sistema de potência, com os métodos diretos TEF se calcula um índice de estabilidade denominado margem de energia transitória (MET), que é a diferença entre a energia transitória crítica (V_{cr}) e a energia transitória no instante de eliminação da contingência (V_{cl}). A energia V_{cl} corresponde à energia injetada durante o período sob falta e a energia V_{cr} representa a capacidade do sistema pós-falta para absorver aquela energia. Para a estabilidade deve-se ter $MET > 0$, caso contrário o sistema é considerado transitoriamente instável.

O cálculo preciso da energia crítica é feito avaliando-se a função de energia no ponto de equilíbrio instável de controle (UEP de controle) do sistema pós-falta, ou seja $V_{cr} = V(\theta^u)$, sendo θ^u o UEP de controle. Portanto, a dificuldade maior nos métodos TEF consiste no cálculo preciso do UEP de controle; esse cálculo por sua vez está estreitamente ligado à definição do UEP de controle. Ou seja, dada uma ou outra definição do UEP de controle usa-se um ou outro método de cálculo.

Os trabalhos pioneiros de El-Abiad, Nagappan e Prabhakara [EL-AB66, PRAB75], nas décadas do 60 e 70, usaram a teoria da função de Lyapunov para analisar a estabilidade transitória de sistemas de potência, e sugeriram que o UEP de controle deveria ser o ponto de equilíbrio instável mais próximo da trajetória do sistema sob falta. Posteriormente Kakimoto et.al. em [KAKI78a, KAKI78b] utilizam uma função de Lyapunov tipo Lur'e e propõem que o UEP de controle corresponde ao ponto de cruzamento da trajetória sob falta com a superfície limite de energia potencial (SLEP), este seria o ponto de saída ou *exit point*. Posteriormente, Athay et.al. em [ATHA79a] utilizam uma função de energia e pela primeira vez adotam o uso do termo SLEP ou PEBS (*Potential Energy Boundary Surface*) quando, tentando vencer o enfoque conservador dos primeiros métodos, propõem que o UEP de controle corresponde ao UEP no limite real de separação, factível de ser obtido ao detectar-se o ponto de interseção de uma trajetória sob falta aproximada com a SLEP. Ribbens-Pavella et.al. em [RIBB81] usam argumentos físicos a fim de justificar que o UEP de controle está relacionado com as máquinas síncronas que primeiro perdem o sincronismo quando a falta é sustentada. No método MOD (*Mode of Disturbance*), proposto por Fouad et.al. [FOUA88, FOUA92], após determinar as máquinas avançadas (ângulos dos rotores maiores que 90°), o UEP de controle é calculado em função do modo de perturbação correspondente a essas máquinas.

Mais recentemente foi proposto o método BCU (*boundary of stability region based controlling unstable equilibrium point*) por Chiang et.al. [CHIA94], sendo considerado o método TEF mais bem sucedido nas aplicações nos sistemas de potência práticos. Trata-se de um método desenvolvido a partir de argumentos analíticos derivados da teoria formal dos sistemas dinâmicos autônomos não lineares [GUCK83, ARRO90]. Na literatura o método BCU também é conhecido como Método do Ponto de Saída (*Exit Point Method*) [FOUA92].

Nesta seção será detalhado o conceito de ponto de equilíbrio instável de controle utilizando uma função de energia para o sistema de potência. A função de energia que está sendo usada neste trabalho é aquela proposta por Athay et.al [ATHA79a], repetida a seguir por conveniência:

$$V(\theta, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n (Pm_i - E_i^2 G_{ii}) \theta_i - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) - \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (4.9)$$

O sistema gradiente associado ao sistema (3.21) é dado por,

$$\tilde{\omega}_i = Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad i = 1, \dots, n \quad (4.10)$$

A função de energia potencial $V_{EP}(\theta)$ é uma componente da função de energia transitória já que $V(\theta, \tilde{\omega}) = V_{EC}(\tilde{\omega}) + V_{EP}(\theta)$. A função de energia potencial do sistema original (3.21) é uma função de energia do sistema gradiente (4.10).

Uma função de energia não é uma função de Lyapunov. Uma parte da literatura dos métodos diretos da estabilidade está voltada às aplicações que usam funções de Lyapunov e outra à utilização das funções de energia, mas qual é o alcance e as características de cada uma delas? Uma resposta a essa questão é abordada em [CHIA89b] onde se mostra que não existe uma função de energia geral para os sistemas de potência com perdas (do sistema de transmissão), excetuando o sistema de uma máquina - barra infinita e os sistemas que apresentam pequenas perdas. Por outro lado, as funções de Lyapunov locais descritas na literatura servem unicamente para determinar a propriedade de estabilidade de um ponto de equilíbrio e não podem ser aplicadas diretamente para determinar a região de estabilidade, excetuando a condição necessária e suficiente de estabilidade assintótica robusta para a existência de uma função de Lyapunov local. Isso corresponde à funções de Lyapunov locais para sistemas com pequenas perdas (pequenas perturbações da matriz admitância de barra reduzida).

A função $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ é uma função de energia do sistema dinâmico (4.1) se [CHIA95b]:

- 1) a derivada da função de energia $V(X)$ ao longo de qualquer trajetória $X(t)$ é não-positiva, ou seja, $\dot{V}(X(t)) \leq 0$.
- 2) Se $X(t)$ não é um ponto de equilíbrio, então não existe um intervalo de tempo tal que $\dot{V}(X(t)) = 0$ para t compreendido dentro desse intervalo. Isto implica que a energia é estritamente decrescente ao longo de qualquer trajetória do sistema.
- 3) Se $V(X(t))$ é limitada, então a trajetória $X(t)$ também é limitada.

Se as duas primeiras condições são satisfeitas por uma função de energia do sistema (4.1), qualquer trajetória do sistema ou converge a um dos pontos de equilíbrio ou diverge, o que corresponde a um comportamento assintótico do sistema. Portanto, considera-se que o sistema não apresenta um comportamento caótico nem oscilatório, não existindo trajetória quase periódica nem ciclo limite nenhum. Por outro lado, se existe uma função de energia V para o sistema (4.1), então qualquer trajetória no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$ converge para um dos pontos de equilíbrio localizados no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$.

A função de energia (4.9) utilizada nos capítulos anteriores leva em conta as condutâncias de transferência, porém, ela não é exata pois não satisfaz as três condições de uma função energia. Esse tipo de funções de energia são funções aproximadas e na literatura [CHIA95b] são chamadas *funções de energia numéricas*. Neste trabalho usa-se a função de energia numérica proposta por Athay *et al.* [ATHA79a] sendo denominada simplesmente como *função de energia*. Diversas aplicações práticas da função de energia (4.9) mostram a sua validade, indicando desse modo o sucesso das funções de energia numéricas na análise da estabilidade transitória direta [ATHA79a, FOUA87, RAHI93, CHIA94]. Funções de energia globais para modelos de sistemas de potência com redução de rede são possíveis de serem obtidas desde que sejam observadas certas condições particulares.

A seguir será feita uma visualização das principais definições matemáticas dadas na seção anterior, mediante um exemplo aplicado a sistemas de potência, contando com o auxílio da superfície de energia potencial dos métodos TEF. O sistema de teste é o sistema WSCC3a que é uma versão modificada do sistema WSCC3 [ANDE77] de 3 geradores dado no Apêndice 1. As modificações consistiram em desprezar as condutâncias de transferência e fazer $P_1 = P_2 = P_3 = 0$ [TREI96].

Na Figura 4.4 é mostrada a superfície de energia potencial (baseada na função de energia potencial $V_{EP}(\theta_1, \theta_2)$ com valores em [pu]) do sistema WSCC3a construída no espaço das coordenadas (θ_1, θ_2) , sendo θ_1 e θ_2 os ângulos em graus dos rotores dos geradores 1 e 2, respectivamente; a referência é o ângulo do rotor do gerador 3. A superfície de energia potencial representa o espaço de estados do sistema pós-falta. Observa-se que a superfície de energia potencial é similar a uma paisagem, qualquer curva na superfície de energia potencial representa uma trajetória. Além disso foram determinados todos os pontos de equilíbrio, que são pontos nos quais a derivada $\dot{V}_{EP} = 0$. O ponto de equilíbrio estável pós-falta (SEP) é o mínimo local da função de energia potencial e no exemplo tem energia potencial nula. Os pontos de equilíbrio instáveis pós-falta (UEPs) estão situados nos topos e pontos de inflexão (pontos de sela) da superfície V_{EP} . Os primeiros seis UEPs são tipo 1 e os outros seis restantes são tipo 2.

Imaginando-se uma projeção vertical, na Figura 4.5 são mostrados todos os pontos de equilíbrio e várias curvas de nível da superfície de energia potencial, projetados nas coordenadas (θ_1, θ_2) , onde se observa que os UEPs mais próximos do SEP são os UEPs tipo 1. Ambas as Figuras 4.4 e 4.5 foram construídas considerando um mesmo intervalo para os valores de θ_1 e θ_2 .

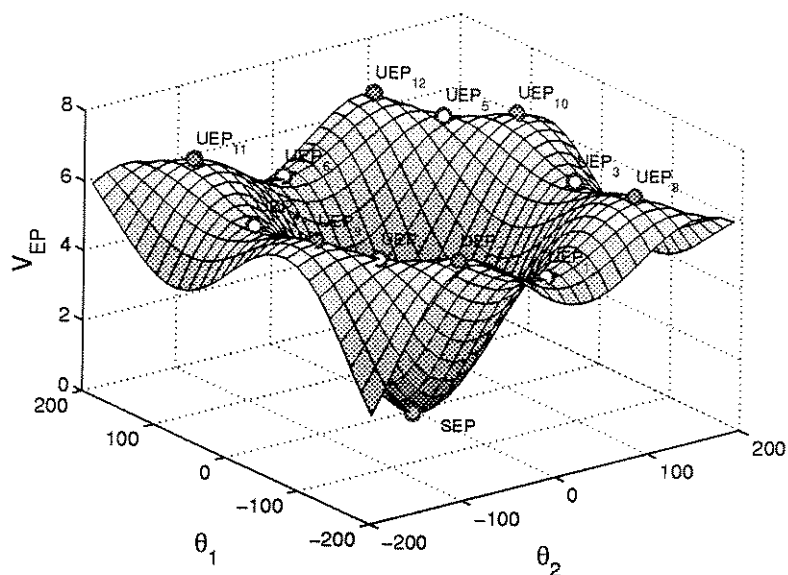


Figura 4.4: Sistema WSCC3a. Superfície de energia potencial e os pontos de equilíbrio estável (SEP) e instáveis (UEP), nas coordenadas de ângulos (θ_1, θ_2) .

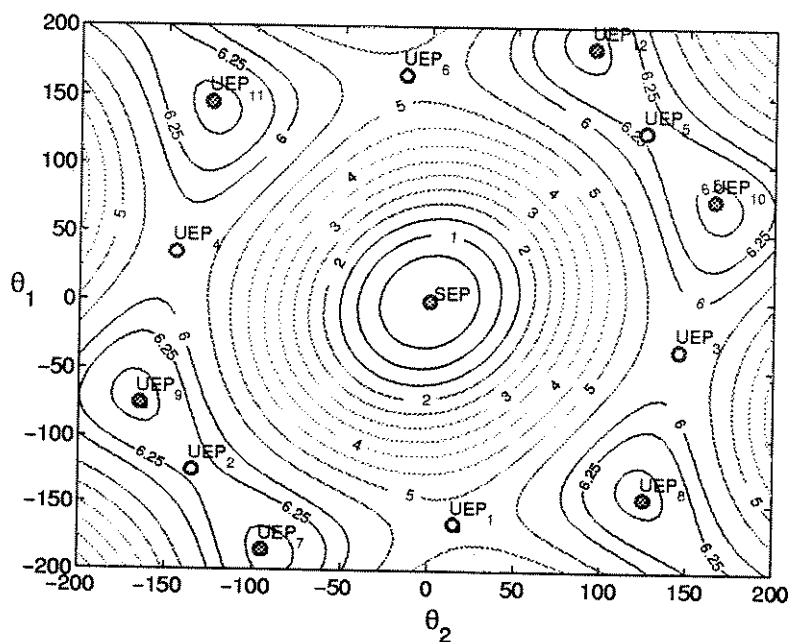


Figura 4.5: Sistema WSCC3a. O total dos UEPs (12) e as curvas de nível da energia potencial, projetados nas coordenadas (θ_1, θ_2) .

Um dos fundamentos dos métodos diretos que usam uma função de energia e o conceito de UEP de controle consiste na caracterização da parte relevante do limite de estabilidade para onde a trajetória sob falta está-se dirigindo.

As curvas de nível da função de energia potencial do sistema WSCC3a para um intervalo mais reduzido dos ângulos (θ_1, θ_2) estão ilustradas na Figura 4.6, que além disso mostra o limite de estabilidade representado pela superfície (ou curva nesse caso) limite de energia potencial (SLEP) e que também é conhecida como PEBS. O limite de estabilidade (PEBS) contém os pontos de equilíbrio instáveis, três deles estão indicados, sendo apenas um dos UEPs de tipo 2. A superfície de energia potencial do lado interno (esquerdo) do PEBS é uma região parcial da região completa de estabilidade $A(SEP)$, o limite de estabilidade é $PEBS = \partial A(SEP)$ que na Figura 4.6 contém três dos doze UEPs. Analisando os valores das energias potenciais dos três pontos de equilíbrio instáveis mostrados, observa-se que o UEP mais próximo do SEP é aquele que tem como energia potencial $V_{EP1} = 5.1618$, em consequência esse UEP é o chamado *closest* UEP para o intervalo de ângulos indicado. Uma metodologia geral para determinar o *closest* UEP consiste na determinação de todos os UEPs para um intervalo dado $[\theta_1, \theta_2]$ que abrange o limite de estabilidade de um SEP e na estimativa do valor da energia potencial de cada um deles; o *closest* UEP será aquele que apresenta o menor valor da energia potencial. No início da década de 70, o *closest* UEP era considerado o UEP de controle, porém leva a resultados conservativos pois independe da trajetória sob falta.

Nos sistemas de energia elétrica o vetor de estado define-se como sendo $X = [\theta, \tilde{w}]^T$, então o ponto de equilíbrio estável pré-falta pode ser denotado por $(\theta^{s1}, \tilde{w} = 0)$, o ponto de equilíbrio estável pós-falta designa-se por $(\theta^{s2}, \tilde{w} = 0)$, e um ponto de equilíbrio instável pós-falta corresponde a $(\theta^u, \tilde{w} = 0)$; esses pontos também são designados simplesmente por θ^{s1} , θ^{s2} e θ^u , respectivamente. Por sua vez o ponto de saída (*exit point*) é aquele ponto de interseção entre a trajetória sob falta e o limite de estabilidade, e é denotado como (θ^e, ω^e) . Para o exemplo mostrado, que usa a função de energia potencial, não é levada em conta a velocidade w^e , em consequência o ponto de saída pode ser denotado simplesmente por θ^e .

A notação anterior é aplicada ao exemplo do sistema WSCC3a, tal como mostra a Figura 4.7. Nessa figura foram geradas as curvas de nível da superfície de energia potencial do sistema na condição pós-falta, assim como os pontos de equilíbrio. Por facilidade considerou-se uma contingência que consiste em um curto-circuito trifásico aplicado no extremo de uma das linhas de transmissão, eliminado sem desconexão de linha, isto é, o sistema pré-falta e o pós-falta são similares resultando assim uma coincidência entre o SEP pré-falta e o SEP pós-falta $(\theta^{s1} = \theta^{s2} = (0, 0)^T)$. A trajetória sob falta sustentada sai de θ^{s1} e cruza o limite de estabilidade no ponto de saída $\theta^e = (-9.99^\circ, 153.40^\circ)^T$ localizado no limite de estabilidade, especificamente na variedade estável $W^s(\theta^{u3})$ de θ^{u3} que é um UEP tipo 1. Para essa trajetória sob falta o UEP de controle é $\theta^{u3} = (-34.8880^\circ, 145.1119^\circ)^T$. Uma trajetória pós-falta cujo ponto inicial seja θ^e deve convergir finalmente para θ^{u3} . É interessante observar que $\theta^{u1} = (-163.5814^\circ, 16.4199^\circ)^T$ continua sendo o *closest* UEP pois ele não depende de trajetória sob falta nenhuma, apenas depende das condições do sistema pós-falta.

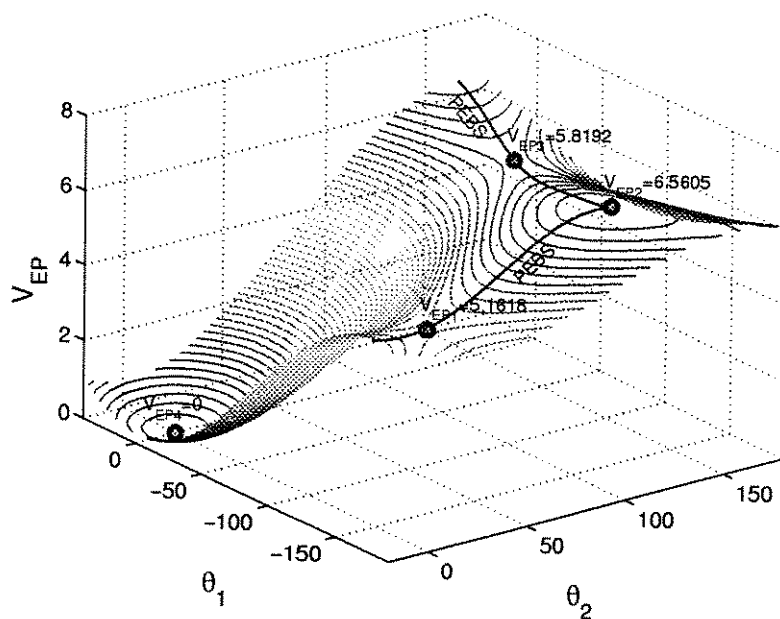


Figura 4.6: Sistema WSCC3a. Curvas de nível da superfície de energia potencial, a PEBS e as energias potenciais transitórias nos pontos de equilíbrio.

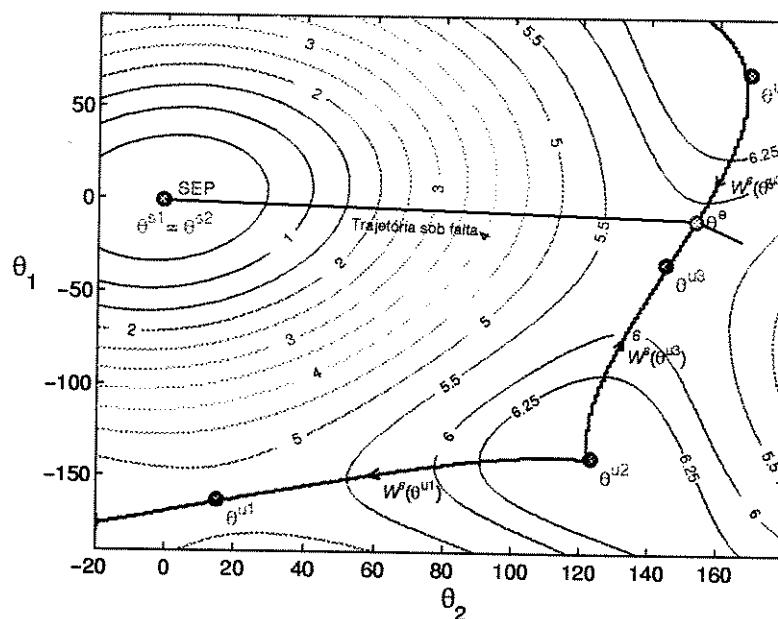


Figura 4.7: Sistema WSCC3a. Trajetória sob falta atravessando a variedade estável $W^s(\theta^{u3})$ no ponto de saída θ^s do limite de estabilidade de θ^{s2} .

A seguir detalha-se a caracterização do ponto de equilíbrio instável de controle, do *closest* UEP e da PEBS, na tentativa de desenvolver procedimentos algorítmicos para estimar a estabilidade transitória dos sistemas de potência mediante a utilização de cada um desses conceitos. Desta vez será utilizado um exemplo correspondente ao sistema de potência CHIANG3 de três geradores que foi proposto em [CHIA89a]; as equações que descrevem esse sistema estão indicadas no Anexo A.

O conceito de *closest* UEP pode ser explicado mediante a superfície de energia potencial do sistema pós-falta e do UEP mostrados nas Figuras 4.8 e 4.9. Essa superfície de energia potencial permite usar a analogia com um copo vazio; conforme ele é enchido de água chega-se ao instante em que a água vai começar a vazar pelo ponto de elevação de menor altura. Esse ponto corresponde a um ponto de sela e é chamado o UEP mais próximo ou *closest* UEP, porque desde o ponto de vista do valor da energia potencial ele fica mais próximo do SEP. Lembre-se que o SEP é o mínimo local da superfície de energia potencial, então é o ponto com menor energia potencial. A hipotética superfície de água máxima é chamada de superfície de energia constante e ela corresponde ao nível de energia potencial do *closest* UEP, isso significa que a altura da água seria o nível de energia constante. Para determinar o *closest* UEP apenas foi utilizado o sistema pós-falta, não foi levada em conta nenhuma trajetória sob falta. É fácil supor que a determinação do UEP mais próximo exige que sejam calculados todos os UEPs. A superfície de energia potencial “molhada” pela suposta água que encheu o exótico copo da Figura 4.8, é a região de estabilidade *aproximada* pela superfície de energia constante do *closest* UEP e que matematicamente corresponde à superfície $\{\delta : V(\delta) < V_{EP}^{clo}\}$, sendo V_{EP}^{clo} a energia potencial do *closest* UEP. Para o cálculo do *closest* UEP de sistemas de potência de grande porte, o elevado número de UEPs a serem calculados origina um excessivo esforço computacional que torna inaplicável a metodologia baseada no *closest* UEP para determinar a estabilidade transitória *on-line*.

Na determinação do UEP mais próximo não é necessário referir-se ao limite de estabilidade que está mostrado nas Figuras 4.10 e 4.11 (a Figura 4.10 é um indício da natureza fractal das soluções). A superfície de energia potencial permite visualizar o limite de estabilidade de um sistema dinâmico da forma (4.1). O limite de estabilidade construído na superfície de energia potencial recebeu o nome de SLEP ou PEBS [ATHA79a]. A PEBS é construída ao unirem-se os pontos de máxima energia potencial das trajetórias sob falta projetadas na superfície de energia potencial, sendo ortogonal às curvas equipotenciais $V_{EP}(\cdot)$. Ao longo da direção ortogonal ao PEBS, a energia potencial V_{EP} atinge um máximo local no PEBS. Kakimoto et.al. [KAKI78a, KAKI78b] sugeriram um procedimento para aproximar a região de estabilidade: 1) a partir da trajetória sob falta, identificar o ponto de saída e determinar o valor da sua energia potencial, V_{EP}^e ; 2) a região de estabilidade aproximada pelo PEBS é dada pela superfície $\{\delta : V(\delta) < V_{EP}^e\}$. Esse procedimento não garante que todos os pontos da região aproximada pelo PEBS estão localizados dentro da verdadeira região de estabilidade do SEP pós-falta X_s . Em [CHIA88c] foi proposto usar o conceito de sistema gradiente com o objetivo de permitir um cálculo mais confiável do UEP de controle, como será mostrado mais adiante.

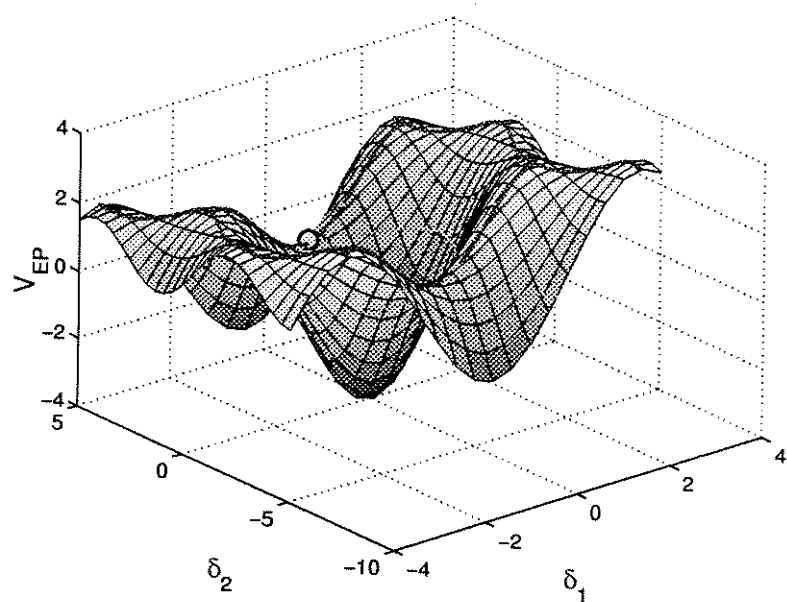


Figura 4.8: Sistema CHIANG3. Superfície de energia potencial, limite de estabilidade e superfície de energia constante nas coordenadas (δ_1, δ_2) ; os ângulos são dados em radianos.

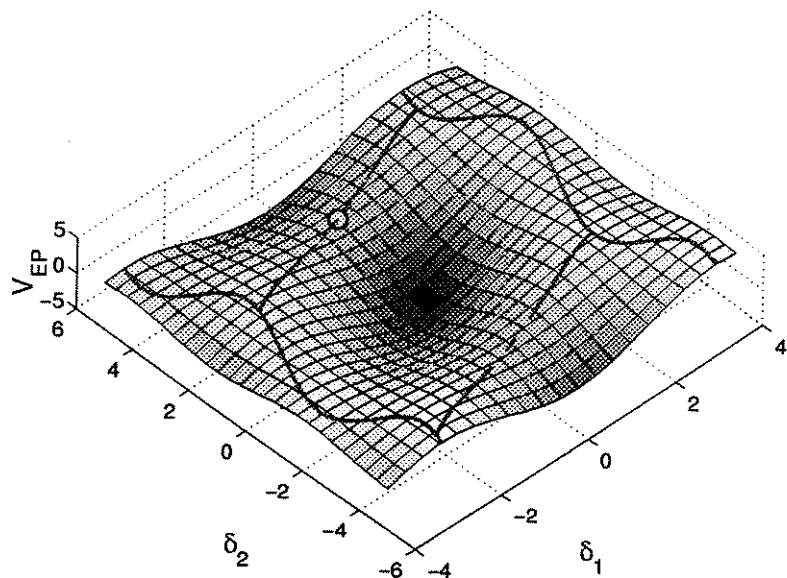


Figura 4.9: Sistema CHIANG3. Outra projeção da superfície de energia potencial, o limite de estabilidade, e a superfície de energia constante nas coordenadas (δ_1, δ_2) ; os ângulos são dados em radianos.

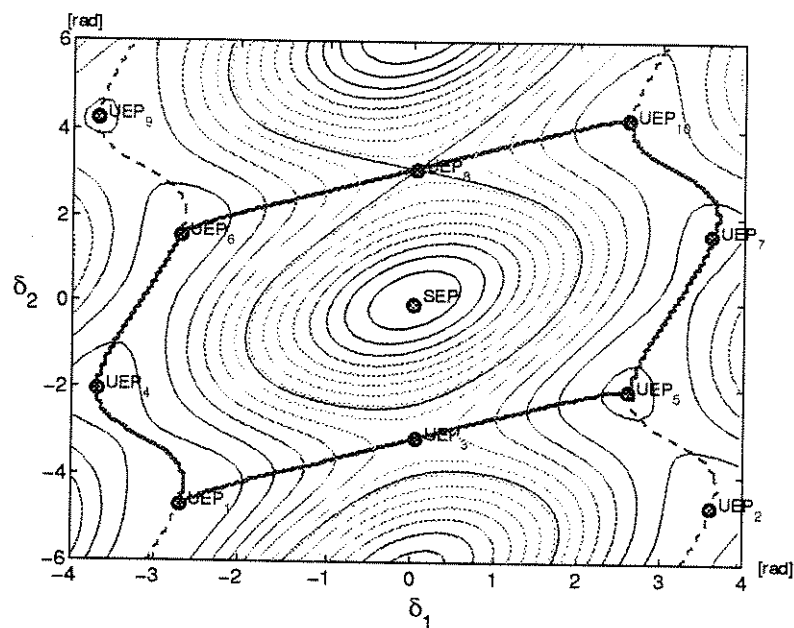


Figura 4.10: Sistema CHIANG3. Gráfico de contorno da energia potencial, o limite de estabilidade e vários pontos de equilíbrio nas coordenadas (δ_1, δ_2) .

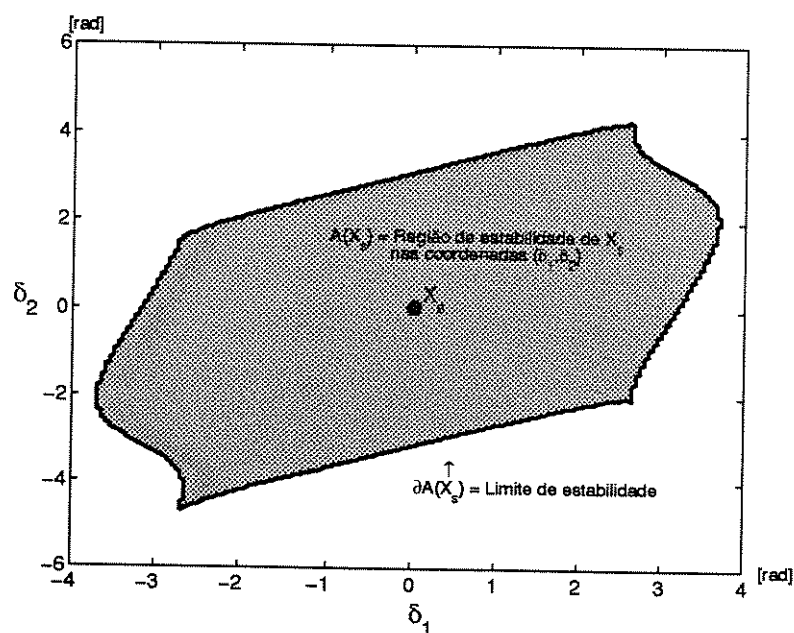


Figura 4.11: Sistema CHIANG3. Região de estabilidade do SEP pós-falta e o limite de estabilidade projetadas nas coordenadas (δ_1, δ_2) .

Na Figura 4.12, $A(X_s)$ é a região de estabilidade ou domínio de atração do ponto de equilíbrio estável pós-falta X_s , projetada no plano (δ_1, δ_2) , limitada pela curva fechada $\partial A(X_s)$. Além disso, na Figura 4.12 foi incluída a projeção da superfície de energia constante $S(\cdot)$, definida no UEP mais próximo do SEP. Esse UEP mais próximo é X_{co} e a sua energia potencial é dada por $V(X_{co}) = -0.3136$ pu. O limite dessa superfície de energia constante é $\partial S(V(X_{co}))$ que representa uma aproximação do verdadeiro limite de estabilidade. Quanto mais próximo for esse limite de estabilidade $\partial S(\cdot)$ do limite exato $\partial A(\cdot)$ tanto melhor será a aproximação da região de estabilidade. Quando a descrição acima é aplicada ao estudo da estabilidade de sistemas de potência, o limite de estabilidade que estará sendo usado pelo método do UEP mais próximo será aquela curva interior fechada de forma quase oval. Assim, o critério para analisar a estabilidade consiste em determinar o *closest UEP*, X_{co} , e depois avaliar a função de energia em X_{co} , considerando esse valor como a energia crítica. A dificuldade está em determinar o *closest UEP*, ou seja, aquele UEP com a menor energia. Isso pode ser feito mediante força bruta através do cálculo de todos os UEPs e depois a comparação das suas energias potenciais. Qualquer ponto inicial de pós-perturbação localizado dentro da região $S(V(X_{co}))$ é considerado estável.

Já o fundamento do método do UEP de controle é descrito graficamente na Figura 4.13. A maior diferença com o método do *closest UEP* é que para determinar o UEP de controle é necessário considerar a trajetória sob perturbação. Essa trajetória sob falta, que inicia a sua evolução no ponto X_s^{pre} , vai definir o ponto de saída X_e localizado no limite de estabilidade. A teoria a respeito estabelece que qualquer ponto pós-perturbação localizado no limite de estabilidade deve convergir para um ponto de equilíbrio instável; sabendo que os UEPs estão localizados no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$, portanto a trajetória pós-perturbação cujo ponto inicial está no limite de estabilidade deverá convergir para um dos UEPs no limite de estabilidade; esse UEP é denominado UEP de controle. No exemplo mostrado na Figura 4.13, a trajetória pós-perturbação que começa em X_e converge para o ponto X_{co} que coincidentemente resultou similar ao *closest UEP*. Se a trajetória sob perturbação tivesse seguido outro caminho, por exemplo no sentido contrário, então o UEP de controle seria diferente de X_{co} e teria sido localizado na parte inferior do limite de estabilidade da Figura 4.13. Dependendo da trajetória do sistema perturbado, o UEP de controle pode mudar, e com ele os valores da energia crítica e da margem de energia transitória. Na prática é muito difícil determinar o ponto X_e pois deve-se derivar uma expressão analítica geral para variedade estável $W^s(X_{co})$. É por esse motivo que a opção de considerar-se X_a como o ponto de saída aproximado é utilizada atualmente. Isso equivale a usar o limite da superfície de energia constante como a aproximação do limite de estabilidade, que é a essência do método da função de energia.

Agora será levada em conta a simulação da trajetória. Na Figura 4.14 são mostradas duas trajetórias pós-perturbação, uma considerando o ponto X_1 (da trajetória perturbada) localizado dentro da região de estabilidade e outra considerando X_2 como o ponto inicial de pós-perturbação. A trajetória pós-contingência que começa em X_1 evolui até convergir em X_s que é o ponto de equilíbrio estável pós-falta da região de estabilidade limitada por $\partial A(X_s)$. Se a trajetória do sistema pós-perturbação começa em X_2 , a sua convergência se dá em um ponto de equilíbrio estável de uma região de atração diferente daquela que está sendo estudada.

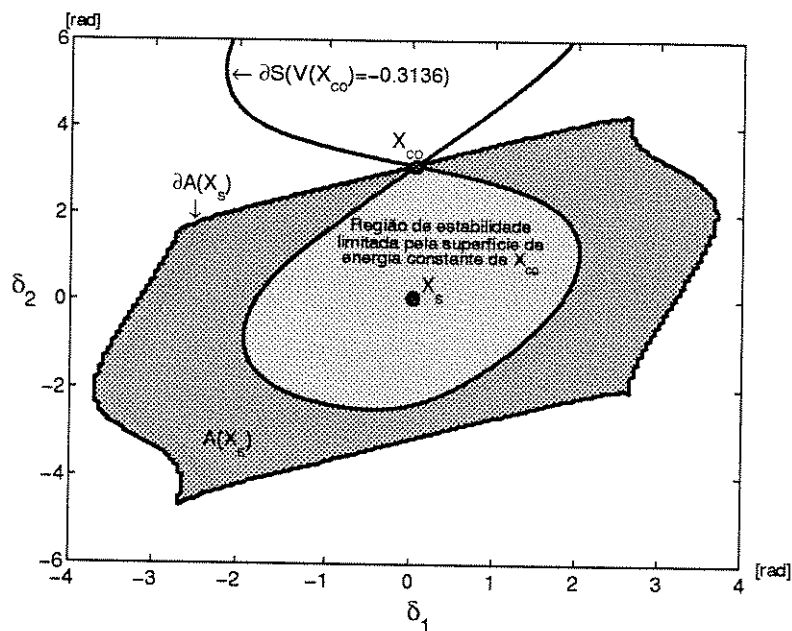


Figura 4.12: Sistema CHIANG3. Intersecção da região de estabilidade e o conjunto conectado da superfície de energia constante do CUEP.

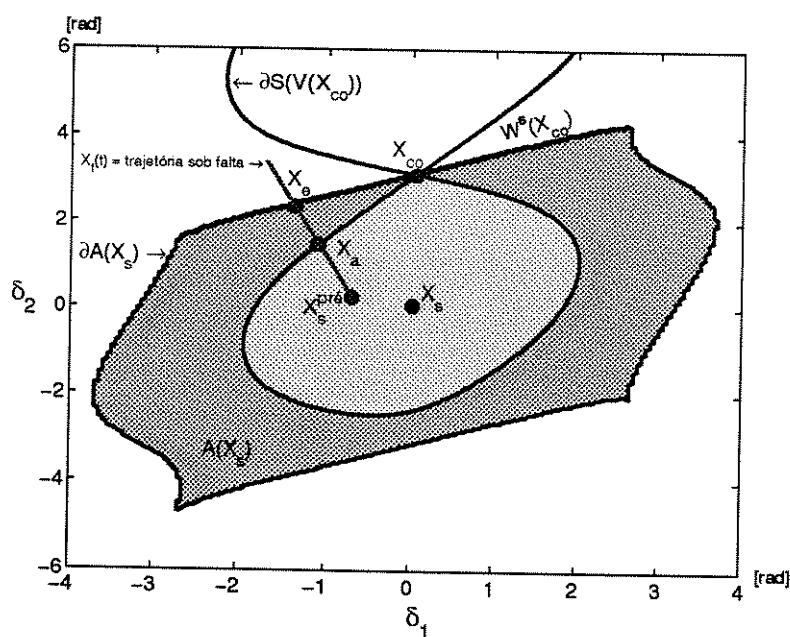


Figura 4.13: Sistema CHIANG3. Trajetória sob falta projetada na região de estabilidade e na superfície de energia constante do CUEP.

Qualquer trajetória pós-perturbação cujo ponto inicial está localizado na região $A(X_s)$ converge para seu ponto de atração X_s e o sistema é considerado estável; caso contrário o sistema é considerado instável. O método da função de energia usa $\partial S(V(X_{co}))$ como o limite de estabilidade, portanto o critério para estabilidade é que qualquer ponto inicial dentro da região $S(V(X_{co}))$, corresponde a uma condição estável. Para esse método, um ponto localizado entre X_a e X_e usado como ponto inicial de pós-perturbação significa uma condição instável, embora realmente corresponda a uma condição de estabilidade.

A Figura 4.15 ilustra uma superfície de energia constante muito conservativa $S(V = -1.0)$ como a região aproximada de estabilidade. A Figura 4.16 ilustra a superfície de energia constante $S(V = -0.1)$ como um exemplo de uma estimativa muito otimista da região de estabilidade. A correspondente visualização em três dimensões dessas situações de subestimativa e superestimativa da região de estabilidade são mostradas nas Figuras 4.17 e 4.18, respectivamente.

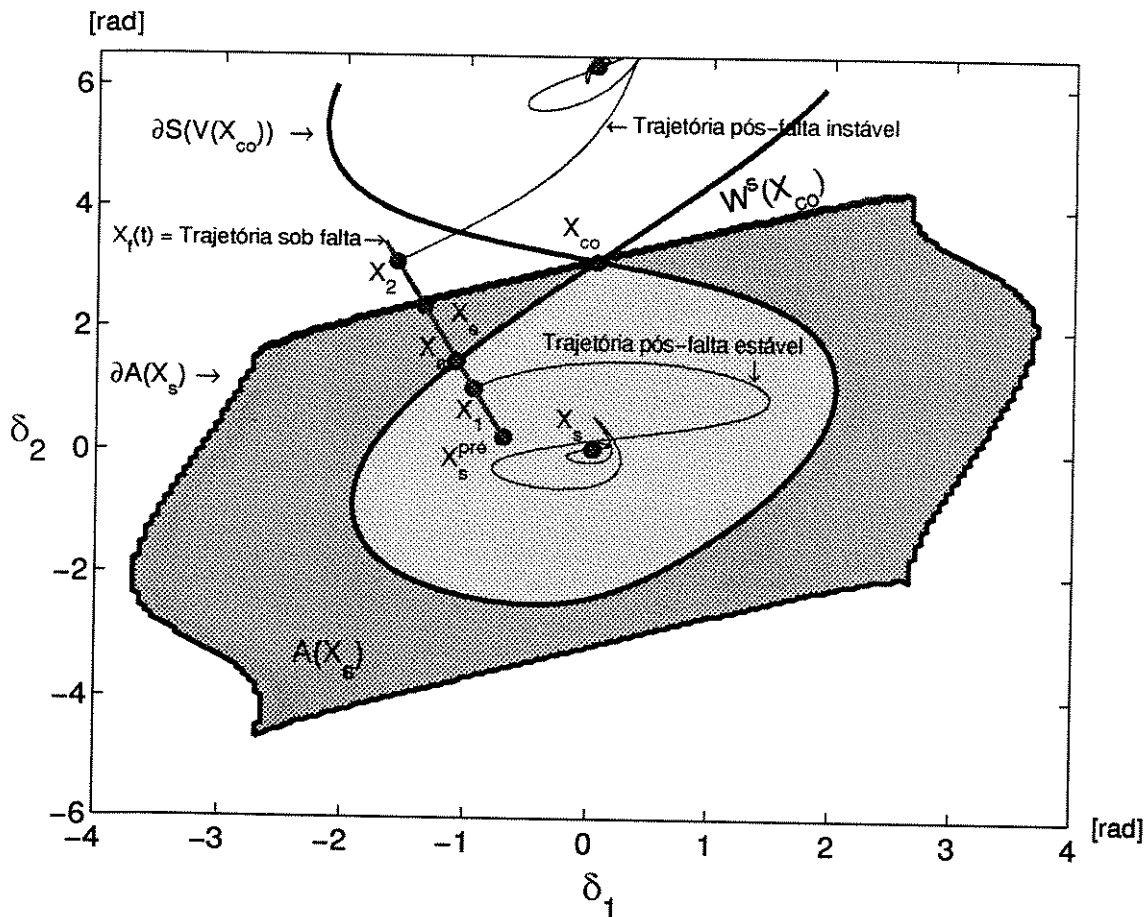


Figura 4.14: Sistema CHIANG3. Trajetórias pós-falta estável e instável projetadas, região de estabilidade e superfície de energia constante de $V(X_{co})$, projetadas nas coordenadas (δ_1, δ_2) .

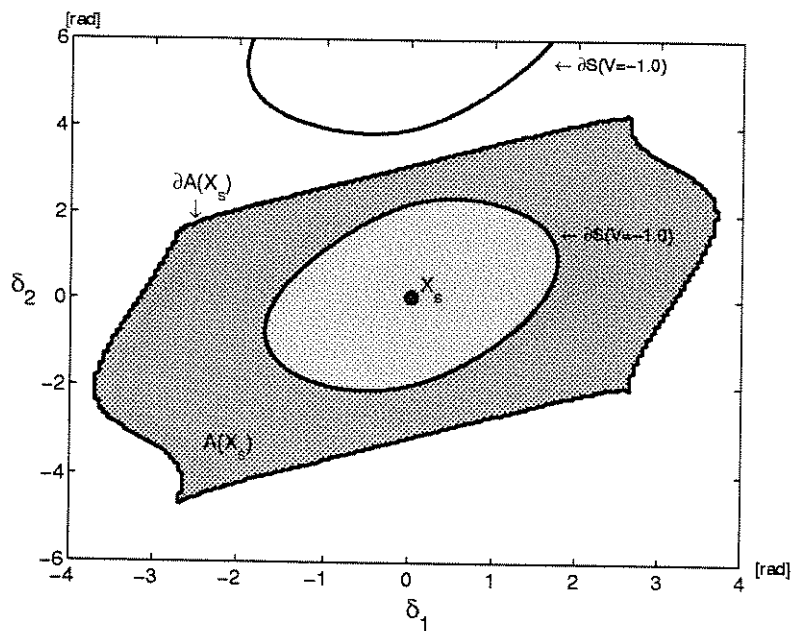


Figura 4.15: Sistema CHIANG3. Região de estabilidade e superfície de energia constante correspondente a uma energia potencial menor que $V(X_{co}) = -0.3136$. Estimativa conservativa.

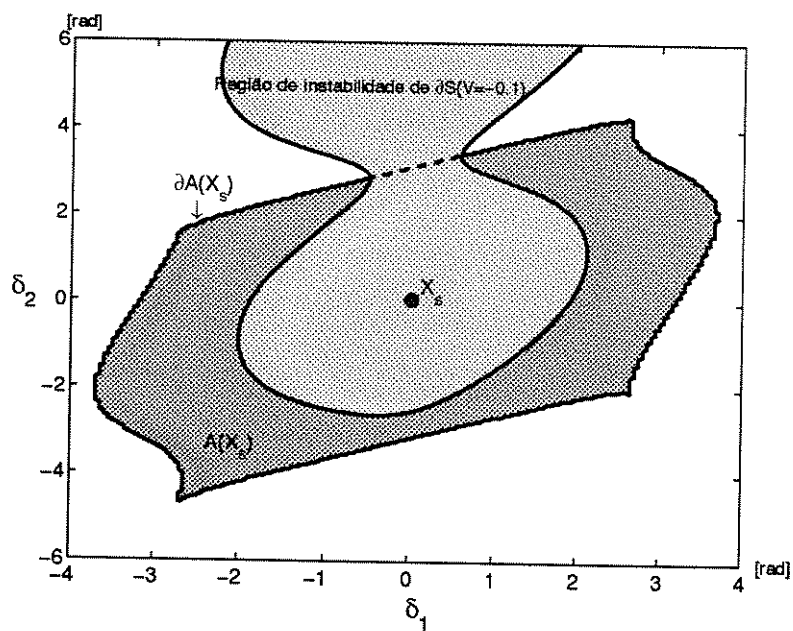


Figura 4.16: Sistema CHIANG3. Região de estabilidade e superfície de energia constante correspondente a uma energia potencial maior que $V(X_{co}) = -0.3136$. Estimativa otimista.

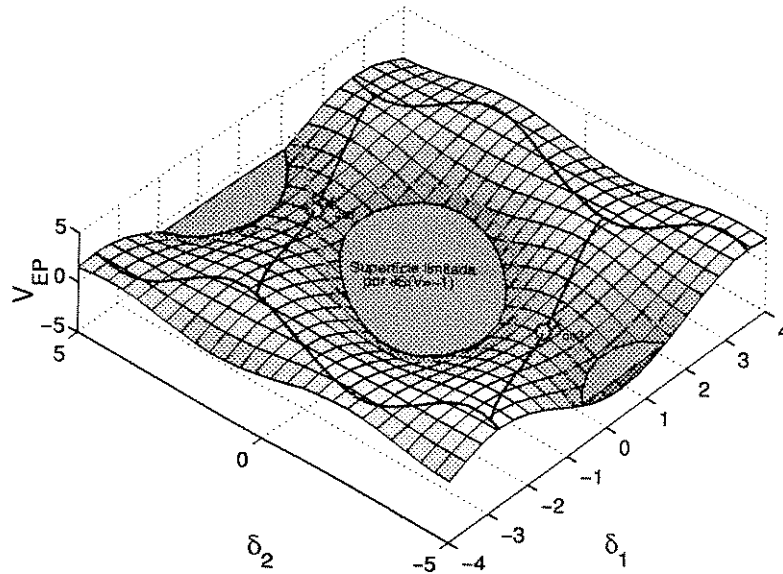


Figura 4.17: Sistema CHIANG3. Região de estabilidade e superfície de energia constante correspondente a uma energia potencial menor ($V = -1.0$) que $V(X_{co}) = -0.3136$. Aproximação conservativa da região de estabilidade.

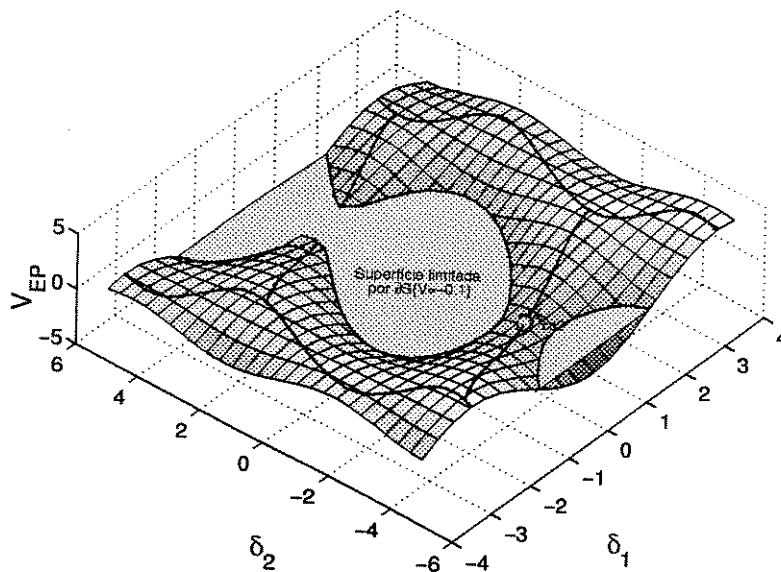


Figura 4.18: Sistema CHIANG3. Região de estabilidade e superfície de energia constante correspondente a uma energia potencial ($V = -0.1$) maior que $V(X_{co}) = -0.3136$. Aproximação otimista da região de estabilidade.

Os dois UEPs mais próximos do SEP do caso base do sistema CHIANG3 são X_{co1} e X_{co2} , como mostrado na Figura 4.17, e têm energias potenciais $V(X_{co1}) = -0.3126$ e $V(X_{co2}) = 0.3148$, respectivamente. Nessa figura ainda é mostrada a superfície $S(V = -1.0)$ que fica abaixo desses UEPs. Já na Figura 4.18 a superfície de energia constante de $V = -0.1$ cobriu o UEP X_{co1} mas ainda continua abaixo do nível de energia potencial do UEP X_{co2} .

Se a determinação da estabilidade for feita usando uma superfície de energia constante muito conservativa (subestimativa) não há risco de erros de avaliação da estabilidade, só que a abrangência e validade dessas estimativas estão limitadas a casos muito estáveis na prática. No caso contrário, se a estabilidade é avaliada contra uma sobreestimativa da energia, várias situações reais de casos instáveis serão considerados como estáveis, comprometendo a confiabilidade da metodologia de análise da estabilidade.

CASO SISTEMA SOB ESTRESSE

Com o objetivo de analisar tanto as características da superfície de energia potencial bem como dos pontos de equilíbrio em sistemas estressados, foi simulado o sistema CHIANG3e, que é uma versão estressada (carga pesada) do sistema de teste CHIANG3 (ver Apêndice A). Na Figura 4.19 mostra-se a superfície de energia potencial, o *closest* UEP e o limite da superfície de energia constante correspondente para esse UEP do sistema CHIANG3e. O gráfico de contorno mostrando algumas curvas de nível da energia potencial no plano (δ_1, δ_2) , bem como o limite de estabilidade e os três pontos de equilíbrio (SEP mais dois UEPs) da região de estabilidade de interesse estão indicados na Figura 4.20.

Quando o sistema está operando sob estresse as energias potenciais dos UEPs análogos aos UEPs do caso base são $X_{co1e} = -1.7326$ e $X_{co2e} = 1.7856$, que aliás são os dois únicos UEPs mostrados na Figura 4.20.

As energias potenciais dos *closest* UEPs do caso base (carga leve) e do caso estressado são $X_{co1} = -0.3126$ e $X_{co1e} = -1.7326$, respectivamente. Os SEPs de ambos os casos estudados foram $X_s = -4.0025$ e $X_{se} = -4.1103$. Isso significa que o *closest* UEP, conforme o sistema fica mais estressado, vai se aproximando do valor do SEP, mas não está-se afirmando que o SEP necessariamente mantém seu valor do caso não-estressado. No limite desse fenômeno deveria-se ter uma situação em que o *closest* UEP (ou o UEP de controle) e o SEP coincidem, o que leva a estabelecer que o SEP desaparece porque simplesmente o sistema já não pode ser mais estável. Estudos confirmando estas afirmações foram realizados pelo autor bem como por outros autores [BERGG93, TREI96], como será mostrado mais para frente. Outra observação importante foi a verificação de que o número de pontos de equilíbrio instáveis ficou reduzido apenas a dois. O desaparecimento dos outros UEPs pode ser explicado pelo fato da superfície de energia potencial ficar mais lisa e inclinada (sem selas nem topos) ao aumentar o estresse. A região de estabilidade do sistema estressado vai ficando menor conforme aumenta o estresse, como pode ser visto comparando-se a superfície de energia constante do *closest* UEP (ou do UEP de controle) àquela correspondente do sistema com carga leve (ver Figuras 4.10 e 4.20).

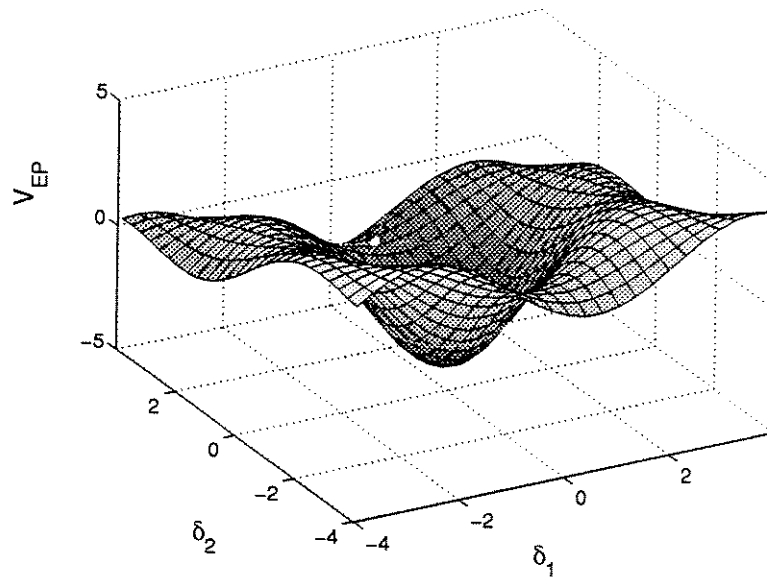


Figura 4.19: Sistema CHIANG3e. Superfície de energia potencial e *closest* UEP de um sistema estressado.

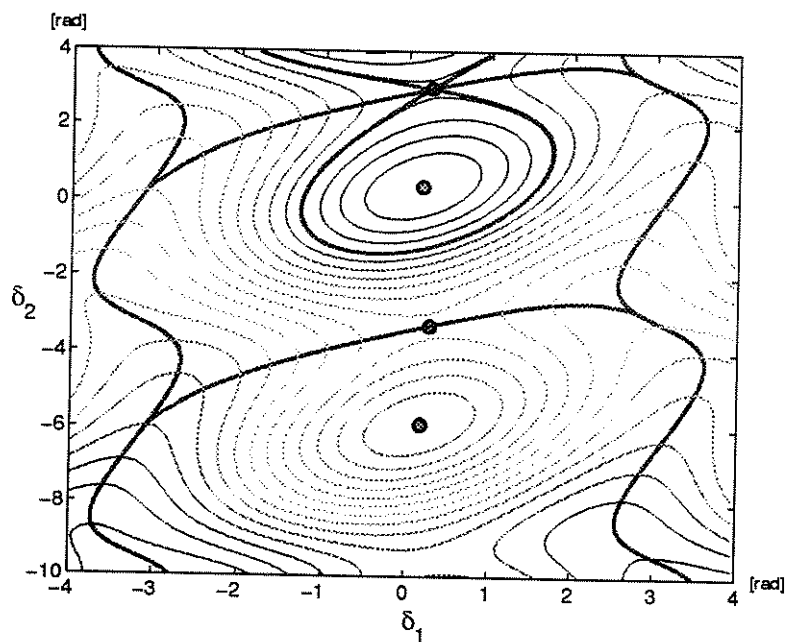


Figura 4.20: Sistema CHIANG3e. Gráfico de contorno da energia potencial, o limite de estabilidade e os pontos de equilíbrio de um sistema estressado.

Essa característica da superfície de energia potencial do sistema estressado, que apresenta menos UEPs e portanto menos pontos de sela e menos máximos (topos) que o sistema não-estressado, está ilustrada nas Figuras 4.21(a) e 4.21(b). Pode-se perceber que ao aumentar o estresse, a superfície de energia potencial começa a ficar mais lisa com menos ondas, no limite seria como uma escada com grades ovaladas. No caso estressado é o declive mais acentuado de V_{EP} , unido ao fato dele ser mais liso, que dificulta a convergência dos métodos numéricos de cálculo dos pontos de equilíbrio.

Na Figura 4.22 apresenta-se uma ilustração das regiões de estabilidade representada pelas superfícies internas dos copos ACB e $A'C'B'$, nota-se a maior inclinação do caso sob estresse, apesar que morfologicamente ACB e $A'C'B'$ são ambas parecidas a um parabolóide cortado (inclinado). Porém a região limitada por S_2 (superfície de energia constante do caso estressado) ficou menor que S_1 (superfície de energia constante do caso não-estressado). Esse último fato indica que em cenários de sistemas sob estresse, a aproximação da região de estabilidade é prejudicada, o que torna mais difícil o sucesso dos métodos de cálculo dos UEPs.

DEFINIÇÃO DO UEP DE CONTROLE

O teorema fundamental proposto por Chiang et al. [CHIA91, CHIA95a] para o método do UEP de controle estabelece o seguinte :

Considere o sistema dinâmico não-linear $\dot{X} = f(X)$, $X \in \mathbb{R}^n$, com uma função de energia $V(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Seja $\hat{X}$ um ponto de equilíbrio no limite de estabilidade $\partial A(X_s)$ desse sistema. Seja $S_c(r)$ o componente conectado do conjunto $\{X : V(X) < r\}$ contendo X_s , e $\partial S_c(r)$ o componente conectado do conjunto $\{X : V(X) = r\}$; então:

1. *A superfície de energia constante conectada $\partial S_c(V(\hat{X}))$ intersecta-se com a variedade estável $W^s(\hat{X})$ unicamente no ponto $\hat{X}$; além disso, o conjunto $S_c(V(\hat{X}))$ tem uma intersecção vazia com as variedades estável $W^s(\hat{X})$.*
2. *Supondo que $X^u \neq \hat{X}$ é um ponto de equilíbrio instável e que $V(X^u) > V(\hat{X})$, o conjunto $S(V(X^u))$ tem uma intersecção não-vazia com o conjunto $\{W^s(\hat{X}) - \hat{X}\}$.*
3. *Se $\hat{X}$ não é o UEP mais próximo, então $\partial S(V(X^u)) \cap (\bar{A}(X_s))^c \neq \emptyset$. Em que $(\bar{A}(X_s))^c$ é o complemento do fechamento da região de estabilidade.*

Comentários: A parte 1 ressalta a natureza conservativa do método do UEP de controle pois sugere que a trajetória perturbada passa através da superfície $\partial S(V(\hat{X}))$ antes de que passe pela variedade estável de $\hat{X}$. As partes 2 e 3 afirmam que se não for usado o UEP de controle exato ($\hat{X}$) senão outro UEP (p.ex. X^u) para o cálculo da energia crítica, implica que a avaliação da estabilidade pode ser muito ou pouco conservativa, ou otimista (incorreta).

Uma definição formal do UEP de controle é dada por [CHIA94, CHIA95a]:

O ponto de equilíbrio instável de controle de uma trajetória sob perturbação é o UEP cuja variedade estável contém o ponto de saída da trajetória perturbada.

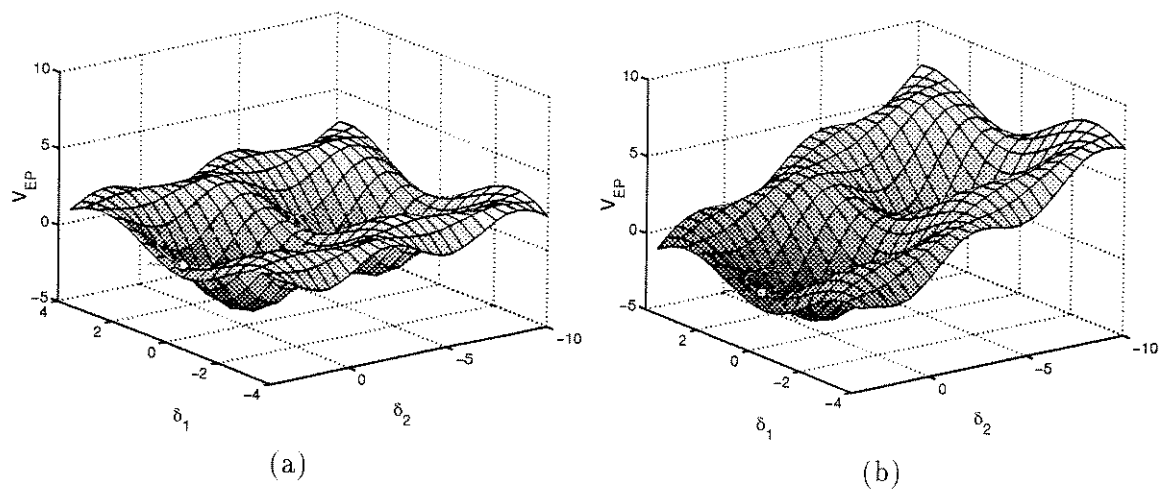


Figura 4.21: Superfície de energia potencial V_{EP} : a) caso carga leve, sistema CHIANG3; b) caso sob estresse, sistema CHIANG3e.

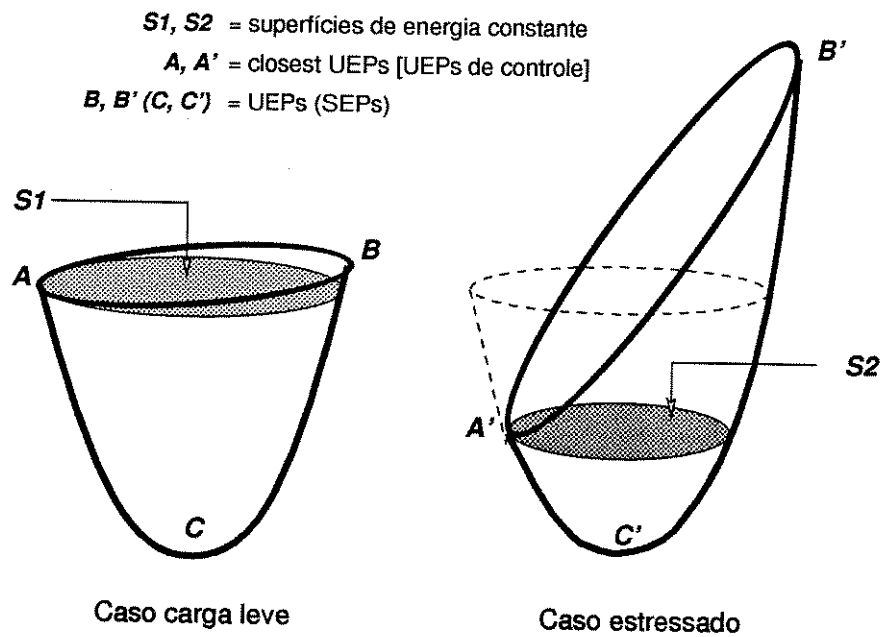


Figura 4.22: Ilustração do conceito de regiões de estabilidade para um sistema com carga leve (sistema CHIANG3) e uma situação de estresse (sistema CHIANG3e).

4.4 Metodologia Proposta para Cálculo do Ponto de Equilíbrio Instável de Controle

Na seção anterior foram descritos os principais avanços na literatura da aplicação da teoria de sistemas não-lineares ao estudo da estabilidade de sistemas de potência que levaram à conceitualização do ponto de equilíbrio instável de controle. Foi citado que para calcular o UEP de controle os possíveis métodos de cálculo são o método do UEP mais próximo (*closest UEP*) [GUPT76], o método PEBS e o método BCU. Recentemente foi proposto o método de sombreamento (*shadowing*) que apresenta comportamento mais confiável que o BCU nos casos de sistemas que operam sob estresse [TREI96], porém exige grande esforço computacional. A seguir será feita uma revisão sucinta do método BCU e será apresentada uma nova metodologia computacional para cálculo do UEP de controle que é mais eficiente e confiável que o BCU e sombreamento, mesmo em casos sob estresse.

A origem e fundamento do método BCU, entendido como método do UEP de controle baseado no limite da região de estabilidade, devem-se ao método PEBS. O método PEBS, tanto na proposta original feita por Kakimoto *et.al.* [KAKI78a, KAKI78b] bem como na versão melhorada de Athay *et.al.* [ATHA79b], estima a energia crítica sem realizar o cálculo do UEP de controle. Já a versão do método PEBS proposta por Chiang *et.al.* [CHIA88c] considera três passos:

- Passo 1.* Integrar a trajetória sob perturbação e detectar o ponto de saída θ^e de cruzamento da superfície limite de energia potencial.
- Passo 2.* Calcular o ponto de equilíbrio do sistema gradiente (equação 4.10) cuja variedade estável contém θ^e ; esse ponto de equilíbrio corresponde ao ponto de gradiente mínimo, $\theta^{m_{gp}}$, que será o valor inicial para determinar o UEP do sistema gradiente resolvendo-se $\partial V_{EP}(\theta)/\partial \theta = 0$ para a solução $\hat{\theta}$.
- Passo 3.* Usar a superfície de energia constante conectada $\{(\theta, \tilde{\omega}) : V(\theta, \tilde{\omega}) = V_{EP}(\hat{\theta})\}$ como a aproximação local do limite de estabilidade $\partial A(X_s)$.

O método BCU utiliza esses conceitos dos métodos PEBS e consiste essencialmente de três passos [CHIA94, CHIA95a]:

- Passo 1.* Integrar a trajetória sob perturbação e detectar o ponto de saída θ^e em que a trajetória projetada θ atinge o primeiro máximo local de $V_{EP}(\theta)$.
- Passo 2.* Usar θ^e como condição inicial e integrar o sistema gradiente pós-perturbação a fim de encontrar o primeiro mínimo local de $\sum_{i=1}^n \|f_i(\theta)\|$; seja esse ponto $\theta^{m_{gp}}$.
- Passo 3.* Usar o ponto $\theta^{m_{gp}}$ como condição inicial para resolver $\sum_{i=1}^n \|f_i(\theta)\| = 0$. A solução é o UEP de controle, θ^u .

Esses três passos do método BCU podem ser esquematicamente visualizados na Figura 4.23. No método BCU a energia crítica corresponde ao valor da função de energia no UEP de controle de um sistema de dimensão reduzida chamado sistema gradiente. Prova-se que o UEP de controle do sistema gradiente corresponde ao UEP de controle do sistema completo [CHIA94, CHIA95a, CHIA95b].

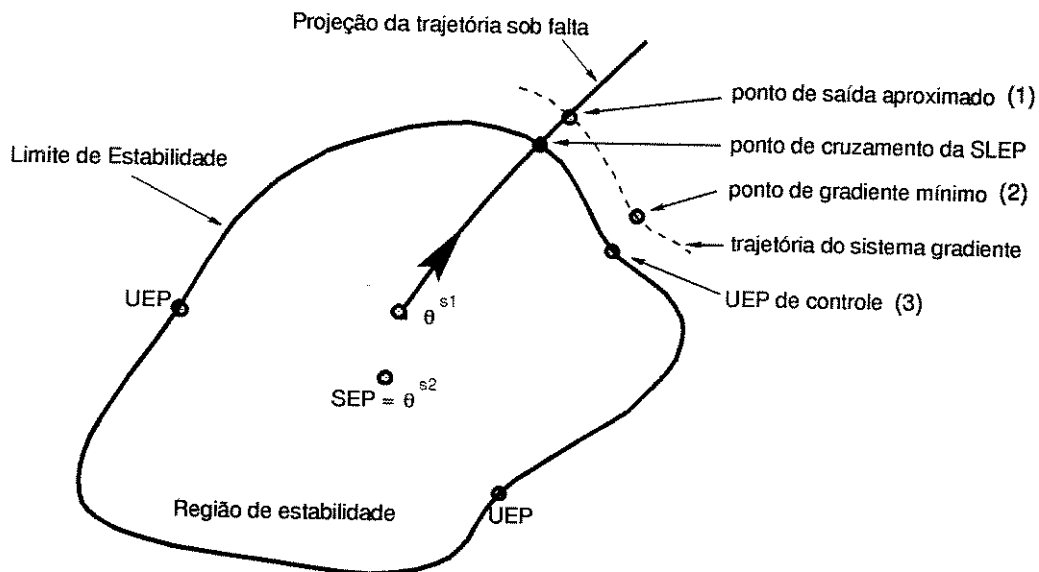


Figura 4.23: Uma visualização gráfica do método BCU no espaço de ângulos.

Conforme a teoria do método BCU o ponto de saída deve encontrar-se na variedade estável do UEP de controle. Em consequência, qualquer trajetória que parte do ponto de saída vai convergir para o UEP de controle à medida que o tempo passa. Porém, isso acontecerá unicamente se o ponto de saída é calculado exatamente. Esse não é o caso nas aplicações práticas, desde que a trajetória é calculada por técnicas numéricas e, consequentemente, o ponto de saída calculado somente encontra-se em uma vizinhança do verdadeiro ponto de saída. Portanto, a trajetória pós-perturbação que se origina no ponto de saída calculado não necessariamente passará através do UEP de controle exato. Em outras palavras, o ponto de saída calculado pode estar fora do domínio de convergência do UEP de controle exato, dando lugar assim a problemas de convergência. Com o objetivo de vencer essa dificuldade, calcula-se o ponto de gradiente mínimo. Desse modo, o único propósito da determinação do MGP é a obtenção de um bom ponto de partida para a solução do UEP de controle.

A hipótese levantada neste trabalho é que se o ponto de saída for detectado com alta precisão e se for utilizado um método numérico robusto para calcular o UEP de controle, então o cálculo do ponto de gradiente mínimo do método BCU não é mais necessário. Deve ser observado que no método BCU, a determinação do MGP surgiu de uma necessidade computacional e não de uma necessidade conceitual nem teórica.

Para implementar e testar a metodologia proposta no parágrafo anterior, o ponto de equilíbrio instável de controle pode ser calculado como segue:

- Passo 1.* Simular no domínio do tempo as equações diferenciais a fim de determinar a trajetória sob perturbação do sistema original (3.21), até alcançar o ponto de saída θ^e , que é obtido ao detectar-se de forma precisa o cruzamento por zero do produto interno $\langle -f, \tilde{w} \rangle$; ver a seção 4.5 para uma explicação detalhada do procedimento.
- Passo 2.* Inicializando diretamente com o ponto de saída θ^e , resolver $\sum_{i=1}^n [f_i(\theta)]^2 = 0$ para obter θ^u (o UEP de controle), usando um método numérico robusto baseado nos métodos Newton-Raphson e/ou BFGS tal como é explicado na seção 4.6.

4.5 Detecção do Ponto de Saída

Sejam θ^{s2} o ponto de equilíbrio estável pós-perturbação e $A(\theta^{s2})$ a região de atração ou domínio de estabilidade de θ^{s2} de um sistema de potência. Define-se como ponto de saída (*exit point*) o ponto $x^e = (\theta^e, \tilde{\omega}^e)$ em que a trajetória do sistema perturbado cruza o limite da região de estabilidade $\partial A(\theta^{s2})$ de θ^{s2} , sendo que nos métodos TEF esse limite está representado pela superfície limite de energia potencial. Diversos autores têm verificado que computacionalmente a detecção precisa do ponto de saída é muito importante devido à extrema sensibilidade que os métodos numéricos para calcular o UEP de controle apresentam à inicialização.

Conceitualmente estabelece-se que o ponto de saída acontece no preciso instante em que a energia potencial atinge o seu primeiro valor máximo ao longo da trajetória do sistema de potência sob perturbação. O primeiro máximo da função de energia potencial verifica-se quando a derivada da energia potencial é nula:

$$\frac{dV_{EP}}{dt} = 0 \quad (4.11)$$

A determinação prática do ponto de saída pode ser feita de várias maneiras: uma delas consiste no cálculo de $(\theta^e, \tilde{\omega}^e)$ no instante da detecção da máxima energia potencial EP_{max1} ao longo da trajetória sob falta; outra consiste em detectar o ponto no qual a derivada da energia potencial se anula.

O primeiro procedimento pode ser computacionalmente ineficiente pois a avaliação da função de energia potencial V_{EP} requer um intenso esforço computacional e, devido à forma da curva de energia potencial, um número bastante elevado de pequenos passos de integração numérica pode ser necessário para conseguir a precisão desejada.

Um procedimento mais eficiente para detectar o ponto de saída consiste em achar, na trajetória sob falta, o primeiro ponto que satisfaz a seguinte condição:

$$\frac{dV_{EP}}{dt} = \frac{\partial V_{EP}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} = \langle -f, \tilde{\omega} \rangle = 0 \quad (4.12)$$

em que f e $\tilde{\omega}$ são vetores n -dimensionais das funções $f_i(\theta)$ e das velocidades angulares $\tilde{\omega}_i$, respectivamente.

Em [FOUA92] o cruzamento por zero, implicitamente indicado pela equação 4.12, é realizado em três passos: 1) integrar numericamente a trajetória sob falta até verificar uma mudança no sinal do produto interno $\langle -f, \tilde{\omega} \rangle$; 2) armazenar a solução do passo de integração anterior e reduzir o tamanho do passo de integração em uma ordem de magnitude; 3) repetir os passos 1 e 2 até a quantidade $|\langle -f, \tilde{\omega} \rangle| < 10^{-5}$. Esse método é preciso porém ineficiente pois utiliza um grande número de passos de integração numérica após a primeira detecção de mudança de sinal de $\langle -f, \tilde{\omega} \rangle$.

Visando melhorar a eficiência e confiabilidade do método citado, desenvolveu-se um novo método de detecção do ponto de saída. A Figura 4.24 ilustra graficamente o método proposto que é descrito no algoritmo seguinte:

Passo 1. Utilizando um passo de integração Δt , integrar numericamente a trajetória do sistema sob falta até a determinação de uma mudança no sinal do produto interno $\langle -f, \tilde{\omega} \rangle$; armazenar a solução do passo anterior (ponto a);

Passo 2. Obter um novo tamanho de passo de integração considerando um critério de interpolação linear expresso pela fórmula seguinte,

$$\Delta t_{novo} = \left| \frac{f\tilde{\omega}_a \times \Delta t}{f\tilde{\omega}_b - f\tilde{\omega}_a} \right| \quad (4.13)$$

Passo 3. Usando esse novo tamanho de passo e recomeçando da solução do passo anterior (ponto a), obter uma nova solução; nota-se que a nova solução usando o passo Δt_{novo} corresponde a um ponto localizado à esquerda (ponto a') ou à direita (ponto b') do ponto de cruzamento por zero; se é obtido o ponto a' então substituir a por a' ; em caso contrário, substituir b por b' ;

Passo 4. Se a quantidade $|\langle -f, \tilde{\omega} \rangle|$, calculada no ponto a' , for menor que uma tolerância dada ϵ , parar e considerar o ponto a' como sendo o ponto de saída; em caso contrário, voltar ao Passo 2.

Uma das características desse método é que, após a detecção da primeira mudança de sinal de $\langle -f, \tilde{\omega} \rangle$, precisam-se de poucos passos de integração e interpolações lineares (tipicamente três ou quatro para uma tolerância $\epsilon = 10^{-6}$) para alcançar a tolerância especificada. Esse procedimento, além de ser mais rápido, é mais preciso que outros métodos existentes na literatura porque evita a geração e propagação de erros, encontrados normalmente nas integrações numéricas de equações diferenciais não lineares após numerosos passos sucessivos.

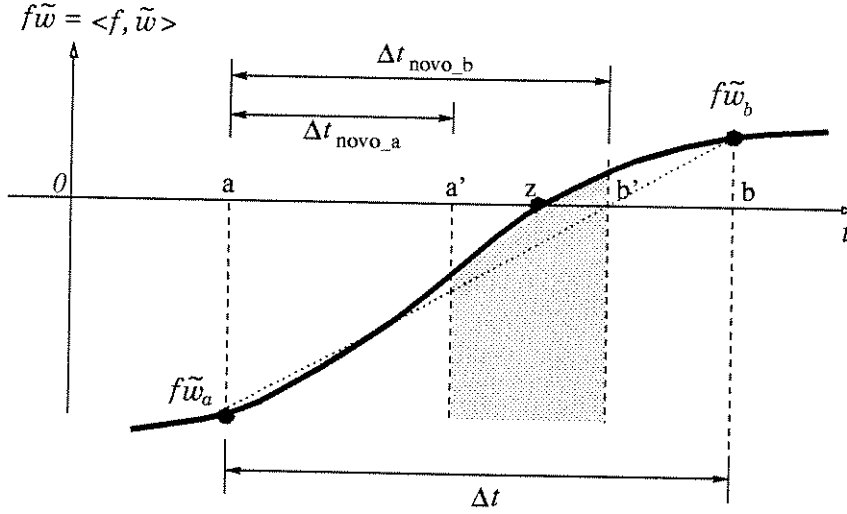


Figura 4.24: Detecção do cruzamento por zero de $\langle f, \tilde{w} \rangle$ usando interpolação linear.

Com a finalidade de mostrar as vantagens do método proposto foi feita uma aplicação usando o sistema IEEE50 de 50 geradores, 145 barras e 453 ramos. A perturbação consistiu em um curto-circuito trifásico aplicado nas proximidades da barra 7 do ramo 7-6; as potências dos geradores localizados nas barras 93 e 110 foram incrementadas de 700 MW para 1300 MW cada, a fim de simular uma típica condição de operação estressada (sistema altamente carregado); a falta é eliminada retirando-se o ramo 7-6. Usando o método de integração trapezoidal implícito e um tamanho de passo de 0.0108 s, a primeira detecção de mudança de sinal de $\langle -f, \tilde{w} \rangle$ aconteceu após 27 passos de integração. Lembre-se que esta etapa é comum tanto para o método de interpolação proposto quanto para os outros métodos. Em seguida, o procedimento da referência [FOUA92] precisou de mais outros 27 passos de integração (54 passos no total) para detectar o ponto de saída com uma tolerância de 10^{-6} . No entanto, o método de interpolação proposto nesta seção precisou de apenas 4 interpolações (um total de 31 passos) para a mesma tolerância, gastando um tempo de computação 85% menor.

É interessante destacar que os dois métodos em análise podem levar a pontos de saída ligeiramente diferentes no espaço- θ . Porém, essa pequenissima discrepância pode ser suficiente, especialmente em sistemas sob estresse, para perturbar a solução do ponto de equilíbrio instável de controle, que é extremamente sensível às condições iniciais. Assim por exemplo, no caso da falta citada anteriormente, o cálculo do UEP de controle, partindo do ponto de saída obtido pelo método da referência [FOUA92], e utilizando o método Newton-Raphson para uma tolerância de 10^{-6} , exigiu 41 iterações. Levando em conta as mesmas circunstâncias, porém partindo do ponto de saída obtido mediante interpolação, a determinação do mesmo UEP de controle exigiu somente 34 iterações. Resultados similares foram obtidos para diferentes testes com o sistema IEEE50 e outros sistemas de pequeno a grande porte, levando a concluir que o método de interpolação produz melhores pontos iniciais para o cálculo do UEP de controle.

4.6 Cálculo dos Pontos de Equilíbrio

Nas metodologias diretas de análise da estabilidade transitória baseadas na função de energia é fundamental o cálculo dos pontos de equilíbrio, especialmente dos pontos de equilíbrio instáveis. É importante que a margem de energia seja calculada de forma precisa com a finalidade de possibilitar uma análise correta da estabilidade transitória e isso pode ser conseguido somente se a energia crítica é determinada de forma precisa, por exemplo em função do UEP de controle. Nesse sentido as metodologias TEF aproximadas são suscetíveis de realizar estimativas errôneas da estabilidade transitória, ainda mais quando os sistemas são de grande porte e operam em situação de estresse. Neste capítulo trata-se exclusivamente do cálculo exato do UEP de controle mediante técnicas numéricas eficientes.

O cálculo exato dos pontos de equilíbrio dos sistemas de energia elétrica reais de grande porte não é um problema de solução trivial. Numericamente falando é comum os métodos numéricos apresentarem divergência ou convergência difícil ou ainda convergência para um ponto de equilíbrio errôneo.

Os pontos de equilíbrio de um sistema de potência correspondem fisicamente a situações momentâneas em que as velocidades dos rotores das máquinas síncronas são nulas, isto é, $\omega_i = 0$. Isso pode ser observado graficamente utilizando-se a superfície de energia potencial, no caso de sistemas de dois ou três geradores (ver Figura 4.4).

Matematicamente, o cálculo dos pontos de equilíbrio tanto estáveis quanto instáveis corresponde a resolver o mesmo problema, porém a diferença está nas condições iniciais. Para calcular o ponto de equilíbrio estável pós-perturbação θ^{s2} , o valor inicial normalmente utilizado é o ponto de equilíbrio estável de pré-perturbação θ^{s1} , pois assume-se que a região de estabilidade de θ^{s2} contém o ponto θ^{s1} . Também considera-se que ambos os pontos estão próximos. Para calcular o ponto de equilíbrio instável de controle pós-perturbação (θ^u), o ponto de partida pode ser o ponto de gradiente mínimo (do método BCU) ou o ponto de saída (como é proposto neste trabalho) ou o ponto final do método de sombreamento.

O problema de cálculo dos pontos de equilíbrio pode ser formulado de duas maneiras. Na primeira formulação o problema consiste na solução de um conjunto de equações algébricas não-lineares que definem a função de potência acelerante, da seguinte forma:

$$f_i(\theta) = Pm_i - Pe_i(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(\theta) = 0 \quad (4.14)$$

sendo as incógnitas os ângulos dos rotores θ , e $i = 1, \dots, n$.

Por outro lado, o problema pode ser também formulado como um problema de otimização sem restrições:

$$\text{Min } \left\{ F(\theta) = \sum_{i=1}^n [f_i(\theta)]^2 \right\} \quad (4.15)$$

Ambas as duas formulações (4.14) e (4.15) podem ser usadas para encontrar o SEP ou o UEP de controle, dependendo apenas das condições iniciais fornecidas ao algoritmo. Na primeira abordagem qualquer método numérico de solução de equações algébricas não lineares é factível de ser aplicado, assim por exemplo têm-se os métodos Newton-Raphson, Newton, Gauss-Newton, etc. No caso de considerar-se um problema de minimização, o problema pode ser resolvido usando por exemplo o método da máxima descida [EL-AB66], Davidon-Fletcher-Powell (DFP) [ATHA79b], o método Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) - que está sendo proposto neste trabalho, entre outros. Nessa segunda formulação também podem ser utilizadas versões dos métodos Newton-Raphson, Newton, Gradiente Conjugado, etc.

Existe uma variante na primeira formulação que consiste em resolver o problema como um fluxo de potência convencional utilizando o método de Newton-Raphson [IRIS94]. Esse método possibilita que a rede não seja reduzida, preservando a esparsidade, e permitindo maior eficiência computacional em sistemas de grande dimensão.

Cada um dos métodos de solução apresenta vantagens e desvantagens, em termos de eficiência ou confiabilidade. Os métodos da família Newton até agora têm mostrado maior sucesso, sendo o Newton-Raphson o mais eficiente e rápido.

Neste trabalho foram testados os seguintes métodos para obter os pontos de equilíbrio, usando ora uma formulação ou outra: Newton-Raphson modificado, Newton de segunda ordem, BFGS (formulação 4.15 com rede reduzida), Fluxo de Potência Newton-Raphson completo e Newton-Raphson Desacoplado Rápido BX (formulação 4.14 com esparsidade preservada). A seguir são descritos os algoritmos dos métodos citados.

4.6.1 Método Newton-Raphson Modificado

A seguir descreve-se a versão do algoritmo de Newton-Raphson (NR) de primeira ordem utilizada neste trabalho:

Passo 1. Inicializar $k = 0$, $F_{min} = +\infty$; definir k_{max} , ϵ_1 , ϵ_2 , α_{max} , α_{min} .

Passo 2. Se $F(\theta^k) \leq \epsilon_1$ ou $k = k_{max}$, então terminar considerando θ^k como a solução; caso contrário continuar com o Passo 3.

Passo 3. Se $F(\theta^k) < F_{min}$ atualizar $F_{min} = F(\theta^k)$ e armazenar $\theta^{inc} = \theta^k$ como a solução incumbente; caso contrário ir ao Passo 4.

Passo 4. Se $k > 0$ e $\alpha = 1$ ir ao Passo 5; caso contrário formar e escalar a matriz Jacobiana $[J(\theta^k)]$ do sistema (4.14).

Passo 5. Calcular a direção de busca $\Delta\theta^k$ a partir de:

$$[J(\theta^k)] \Delta\theta^k = -f(\theta^k) \quad (4.16)$$

Passo 6. Calcular o passo α que minimiza $F(\theta^k)$ na direção de busca, usando interpolação cúbica:

$$\alpha = \alpha_y - \frac{(\alpha_y - \alpha_w)[F'_y + r - s]}{F'_y - F'_w + 2r} \quad (4.17)$$

sendo:

$$F'_y = \frac{\partial F}{\partial y} = 2 f(y)^T [J(y)] \Delta\theta^k; \quad y = \theta^k + \alpha_y \Delta\theta^k$$

$$F'_w = \frac{\partial F}{\partial w} = 2 f(w)^T [J(w)] \Delta\theta^k; \quad w = \theta^k + \alpha_w \Delta\theta^k$$

$$r = \sqrt{s^2 - F'_w F'_y}; \quad s = 3 \left(\frac{F_w - F_y}{\alpha_y - \alpha_w} \right) + F'_w + F'_y$$

Se $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$ então $\alpha = 1$.

Passo 7. Atualizar o vetor θ^k mediante:

$$\theta_i^{k+1} = \theta_i^k + \alpha \Delta\theta_i^k; \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (4.18)$$

$$\theta_n^{k+1} = - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{M_i}{M_n} \theta_i^{k+1} \quad (4.19)$$

Passo 8. Se $F(\theta^{k+1}) > F(\theta^{inc}) + \epsilon_2$ terminar, considerando θ^{inc} como a solução; caso contrário, incrementar o contador de iterações $k = k + 1$ e voltar ao Passo 2.

Observações: O algoritmo NR apresentado é diferente da versão da referência [FOUA92] em dois aspectos: (a) No Passo 6, enquanto o processo de solução permanece dentro da região de convergência, o passo α é considerado igual a um, desde que o seu valor esteja compreendido dentro do intervalo $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$, evitando desse modo cálculos desnecessários durante a atualização da matriz Jacobiana; recomenda-se o uso do intervalo $[\alpha_{min} = 0.9, \alpha_{max} = 1.1]$; (b) No Passo 8 foi incluído um mecanismo de salvaguarda para permitir que o algoritmo continue além de mínimos locais da função $F(\theta)$. A Figura 4.25 apresenta um caso em que esse mecanismo é fundamental para assegurar que o UEP de controle resultante é o correto.

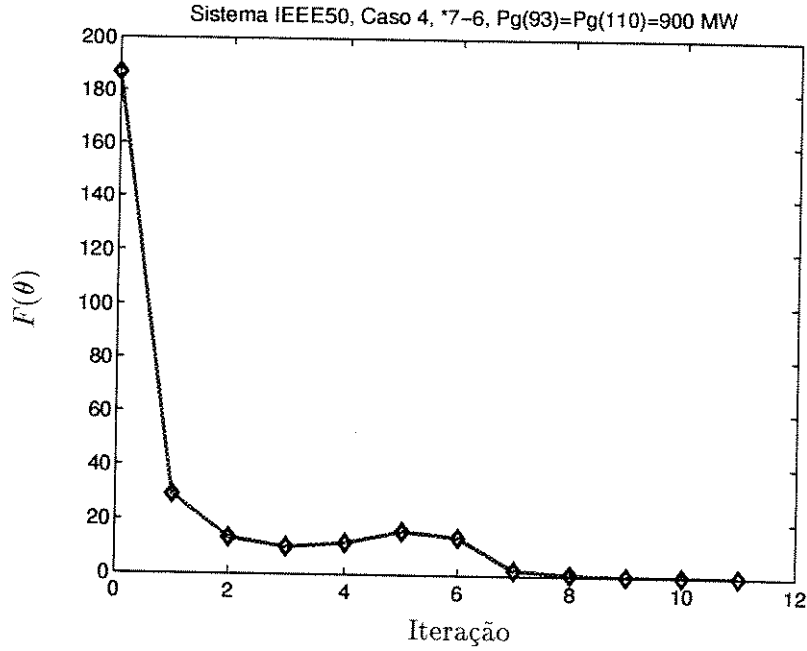


Figura 4.25: Convergência do método Newton-Raphson durante o cálculo do CUEP, partindo do ponto de saída ($\epsilon_1 = 10^{-6}$, $\epsilon_2 = 20$).

4.6.2 Método Newton de Segunda Ordem

Sejam $g(\theta)$ e $G(\theta)$ o vetor gradiente e a matriz Hessiana de $F(\theta)$, respectivamente; sejam $J(\theta)$ e $G_k(\theta)$ a matriz Jacobiana e a matriz Hessiana de $f_k(\theta)$. As expressões correspondentes são:

$$\begin{aligned}
 g(\theta) &= 2 J(\theta)^T f(\theta) \\
 G(\theta) &= 2 [J(\theta)^T J(\theta) + B(\theta)] \\
 B(\theta) &= \sum_{i=1}^n f_i(\theta) G_i(\theta) \\
 G_k(\theta) &= \left[\frac{\partial^2 f_k}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right]; \quad i, j = 1, \dots, n-1; \quad k = 1, \dots, n
 \end{aligned}$$

A seguir é formulado o algoritmo do método Newton de segunda ordem baseado no algoritmo proposto em [FOUA92]:

Passo 1. Inicializar $k = 0$, $F_{min} = +\infty$; definir k_{max} , ϵ_1 , ϵ_2 , α_{max} , α_{min} , $\theta^{(0)} \in \mathbb{R}^n$.

Passo 2. Se $F(\theta^k) \leq \epsilon_1$ ou $k = k_{max}$, então terminar considerando θ^k como a solução; caso contrário continuar com o Passo 3.

Passo 3. Se $F(\theta^k) < F_{min}$ atualizar $F_{min} = F(\theta^k)$ e armazenar $\theta^{inc} = \theta^k$ como a solução incumbente; caso contrário ir ao Passo 4.

Passo 4. Se $k > 0$ e $\alpha \neq 1$ atualizar e escalar a matriz Jacobiana $[J(\theta^k)]$ do sistema (4.14). Atualizar a matriz $B(\theta^k)$.

Passo 5. Calcular a direção de busca $\Delta\theta^{(k)}$ usando a equação:

$$\left[J^{(k)T} J^{(k)} + B^{(k)} \right] \Delta\theta^{(k)} = -J^{(k)T} f^{(k)} \quad (4.20)$$

Passo 6. Calcular o passo α que minimiza $F(\theta^k)$ na direção de busca usando a interpolação cúbica dada pela equação (4.17) usada no algoritmo do método Newton-Raphson modificado.

Passo 7. Atualizar o vetor θ^k mediante as equações (4.18) e (4.19).

Passo 8. Se $F(\theta^{k+1}) > F(\theta^{inc}) + \epsilon_2$ terminar, considerando θ^{inc} como a solução; caso contrário, incrementar o contador de iterações $k = k + 1$ e voltar ao Passo 2.

Observações: No Passo 1 a matriz Jacobiana $J(\theta^0)$, bem como a matriz $B(\theta^0)$ são inicializadas na condição inicial.

4.6.3 Método BFGS

O método BFGS foi proposto independentemente por Broyden (1970), Fletcher (1970), Goldfarb (1970) e Shanno (1969) [DENN83, BYRD96]; é um método de solução de equações algébricas não-lineares que pertence à família dos métodos quase Newton, isto é, usa uma aproximação da matriz Hessiana inversa. Na prática significa que o método BFGS utiliza informação aproximada de segunda ordem a partir da informação de primeira ordem (gradientes dos passos prévios), porém precisa de um esforço computacional menor comparado ao método Newton baseado na matriz Hessiana. O método BFGS constitui uma alternativa interessante a ser pesquisada para obter pontos de equilíbrio porque é numericamente robusto e demanda um esforço computacional menor que o método Newton.

A seguir descreve-se o algoritmo do método BFGS adotado:

Passo 1. Inicializar $k = 0$, $F_{min} = +\infty$, ajustar: k_{max} , ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 , α_{max} , α_{min} .

Passo 2. Se $|F(\theta^k)| \leq \epsilon_1$ ou $k = k_{max}$ terminar, considerando θ^k como a solução; caso contrário continuar no Passo 3.

Passo 3. Se $F(\theta^k) < F_{min}$ ajustar $F_{min} = F(\theta^k)$ e armazenar $\theta^{inc} = \theta^k$ como a solução incumbente; caso contrário ir ao Passo 4.

Passo 4. Atualizar os primeiros $n - 1$ ângulos dos rotores usando:

$$\theta^{k+1} = \theta^k - \lambda^k H^k g^k \quad (4.21)$$

$$H^{k+1} = (V^k)^T H^k V^k + \rho^k s^k (s^k)^T \quad (4.22)$$

sendo:

$$\rho^k = 1/(y^k)^T s^k, \quad V^k = I - \rho^k y^k (s^k)^T \quad (4.23)$$

$$s^k = \theta^{k+1} - \theta^k, \quad y^k = g^{k+1} - g^k \quad (4.24)$$

em que λ é o comprimento do passo, g é o gradiente da função objetivo $F(\theta)$, I é a matriz identidade, e a matriz H é a Hessiana inversa aproximada. Atualizar também θ_n usando a equação (4.19).

Passo 5. Se $|g^{k+1}| \leq \epsilon_3$, então terminar, considerando θ^{k+1} como a solução; em caso contrário continuar no Passo 6.

Passo 6. Se $F(\theta^{k+1}) > F(\theta^{inc}) + \epsilon_2$ então terminar, considerando θ^{inc} como a solução; caso contrário incrementar o contador de iterações $k = k + 1$ e voltar ao Passo 2.

Observações: A matriz de iteração H^k é definida pelos m mais recentes pares $\{s_i, y_i\}$, $i = k - m, \dots, k - 1$; a matriz $H^{(0)}$ pode ser qualquer matriz diagonal, usualmente a matriz identidade. Durante as primeiras três ou quatro iterações recomenda-se desconectar o mecanismo de controle descrito no Passo 6 pois a função objetivo $F(\theta)$ geralmente exibe grandes variações no início. Um valor típico da tolerância ϵ_3 é 0.001.

4.6.4 Método do Fluxo de Potência Newton-Raphson Esparso

Esse método foi proposto em [IRIS94] como uma alternativa para o cálculo de pontos de equilíbrio de sistemas de grande porte. O problema de resolução dos pontos de equilíbrio é formulado como um fluxo de potência Newton-Raphson esparso convencional mas com características dinâmicas, ou seja, a potência da barra de folga é redistribuída entre os geradores até chegar ao seu valor inicial, normalmente igual a zero; a barra de folga não corresponde àquela barra do fluxo de potência, ela é escolhida entre as barras de carga próximas da perturbação. É um método que não usa a matriz admitância reduzida aos nós internos e preserva sua esparsidade. Considerando que: n = número de geradores, nb = número de barras, o algoritmo (ver Figura 4.26) é descrito a seguir:

Passo 1. Inicializar $k = 0$, ajustar: k_{max} , j_{max} , ϵ_1 , V_{max} , V_{min} . Definir uma das barras de carga como barra de folga (slk). Calcular o vetor inicial dos ângulos das tensões internas $\theta^{(0)} \equiv \theta^{s1}$.

Passo 2. Se $k = k_{max}$ parar e considerar $\theta^{(k)}$ como a solução. Caso contrário, incrementar o contador de iterações $k = k + 1$, inicializar $j = 1$.

Passo 3. Calcular a potência $P_{COI}^{(j)}$ e distribuí-la entre todos os geradores da seguinte forma:

$$Pe_i^{(j)} = Pm_i - P_{COI}^{(j)} \frac{M_i}{M_T}, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.25)$$

Passo 4. Realizar uma iteração do fluxo de potência Newton-Raphson. Se alguma tensão de barra $V_i^{(j)} < V_{min}$ ou $V_i^{(j)} > V_{max}$, ($i = 1, \dots, nb$), então parar e considerar $\theta^{(k-1)}$ como a melhor solução. Caso contrário continuar no Passo 5.

Passo 5. Se o fluxo de potência Newton-Raphson não convergiu e $j < j_{max}$ incrementar $j = j + 1$ e voltar ao Passo 3. Caso contrário, calcular a potência na barra de folga $P_{slk}^{(k)}$ e continuar no Passo 6.

Passo 6. Atualizar os ângulos das tensões internas na referência do centro de inércia, $\theta^{(k)}$.

Passo 7. Se $|P_{slk}^{(k)}| < \epsilon_1$ parar e considerar $\theta^{(k)}$ como a solução do ponto de equilíbrio. Caso contrário continuar no Passo 8.

Passo 8. Redistribuir a potência líquida injetada $P_{slk}^{(k)}$ entre os geradores e voltar ao Passo 2.

Observações: Nas versões implementadas neste trabalho a barra de folga (slk) é escolhida pelo usuário e deve ser a barra de carga mais próxima da barra perturbada. O resultado final depende dessa escolha. A iteração do fluxo de potência Newton-Raphson (Passo 4) é realizada considerando $n + 1$ barras de geração porque a barra (slk) é mais uma barra de geração (tipo $V\theta$), a barra de folga inicial é redefinida como barra de geração tipo PV . Se o processo pára no Passo 4 geralmente significa que o método divergiu.

4.6.5 Método do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido Esparso

O segundo algoritmo desse método é o mesmo do item anterior, apenas trocando as iterações Newton-Raphson completo por iterações do método desacoplado rápido versão BX. Em [IRIS94] e [EJEB96] os métodos desacoplados são descartados por problemas de convergência, mas, aparentemente, não foi usada a versão BX como neste trabalho.

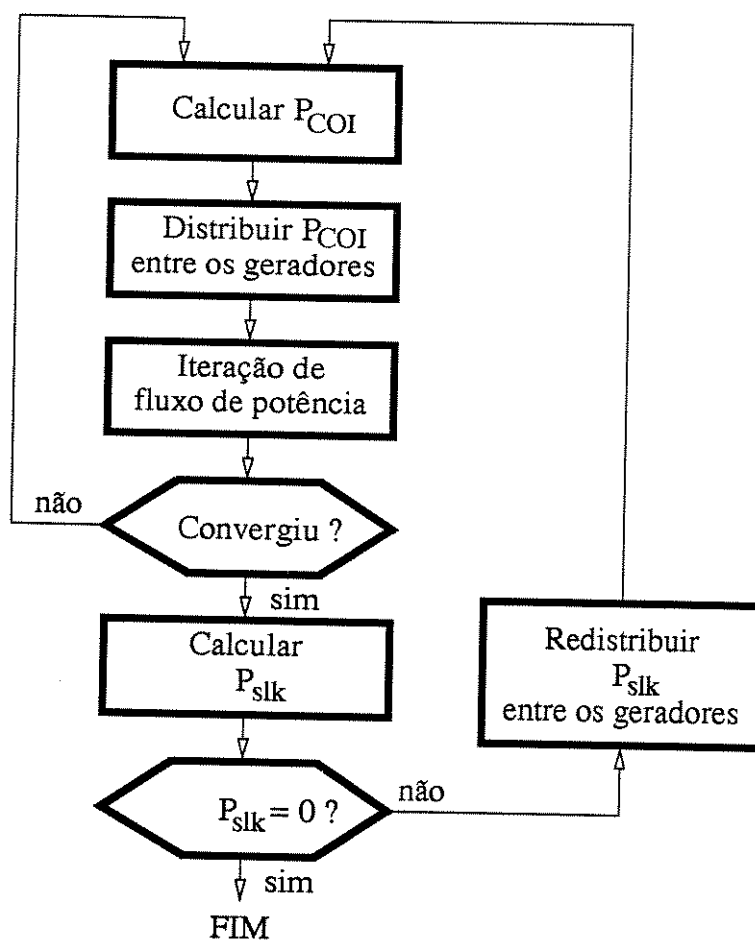


Figura 4.26: Diagrama de fluxo do algoritmo Newton-Raphson esparso.
[IRIS94]

4.7 Testes e Discussão de Resultados

Todos os testes incluídos nesta seção foram realizados utilizando-se o programa *Transtef* desenvolvido durante a pesquisa. Esse programa realiza simulações numéricas no domínio do tempo usando o método de integração trapezoidal implícito preservando a esparsidade da matriz admitância da rede, bem como realiza uma análise direta da estabilidade pelo método TEF obtendo o ponto de equilíbrio instável de controle mediante o método BCU ou pela metodologia aqui proposta. *Transtef* representa os geradores síncronos pelo seu modelo clássico e usa a redução da matriz admitância da rede apenas para a análise da função de energia. Uma descrição mais ampla do programa é feita no Anexo C.

A metodologia proposta para o cálculo dos UEPs de controle foi testada em vários sistemas de potência tanto pequenos quanto de grande porte, operando sob estresse ou não. Alguns dos testes mais representativos serão documentados e discutidos. Os pontos de equilíbrio estáveis e instáveis foram calculados para uma tolerância de $F(\theta) \leq 10^{-6}$ e os pontos de saída foram detectados no instante em que $|\langle f, \tilde{\omega} \rangle| \leq 10^{-6}$. Quando necessário, os pontos de gradiente mínimo foram calculados considerando a norma euclidiana da função de potência acelerante $f(\theta) = 0$. O ponto de equilíbrio estável pré-falta (θ^{s1}) foi considerado como a condição inicial para calcular o ponto de equilíbrio estável pós-falta (θ^{s2}), pois supõe-se que ambos estão próximos um do outro e então a região de estabilidade de θ^{s2} deve conter o ponto θ^{s1} .

Somente serão apresentados os resultados dos UEPs de controle exatos calculados com os métodos Newton-Raphson (NR) e BFGS. Nos testes realizados com o método Newton de segunda ordem comprovou-se que ele é menos confiável que os métodos NR e BFGS sendo computacionalmente mais lento conforme a dimensão do problema aumenta. A robustez do método Newton melhora se o cálculo do passo α for realizado considerando a matriz Hessiana, porém isso o torna ainda mais ineficiente.

4.7.1 Sistema de teste WSCC3

Seis casos de contingências (os mesmos casos estudados em [CHIA95a]), considerando faltas trifásicas nas proximidades de uma barra sendo eliminadas mediante a desconexão do correspondente ramo em que aconteceu a falta, foram testados no sistema WSCC3 (*Western System Coordinating Council*) de 3 geradores. Os dados deste sistema podem ser encontrados em [ANDE77] e também estão incluídos no Apêndice A. Na Tabela 4.1 são mostrados os valores dos SEP, θ^{s2} , e o desempenho de cada um dos métodos utilizados. Observa-se que o método Newton-Raphson é mais rápido, pois o método BFGS não é competitivo para cálculos dos SEPs de sistemas de potência de pequeno porte.

A Tabela 4.2 mostra o número de passos requeridos para detectar o ponto de saída e o ponto de gradiente mínimo, assim como seus valores no espaço θ . Conforme o procedimento descrito na seção 4.5, a detecção do ponto de saída foi conduzida em duas etapas: integração numérica

do sistema sob perturbação usando o método trapezoidal implícito com um passo de 0.02 s até alcançar o primeiro cruzamento por zero do produto interno $f\tilde{\omega}$ (por exemplo, foram 24 passos de integração numérica para o Caso 2); logo após são executados os passos de interpolação linear até conseguir uma tolerância mínima de 10^{-6} (por exemplo, foram gastos 4 passos no Caso 2).

O ponto de gradiente mínimo foi calculado mediante a integração numérica do sistema gradiente pós-falta usando a rotina LSODE [HIND83], tendo como ponto de partida o ponto de saída (ponto de cruzamento do PEBS). A rotina LSODE faz parte do ODEPACK, o pacote numérico para resolver equações diferenciais que tem sido usado e considerado na literatura como o mais adequado para obter o MGP. Os resultados na Tabela 4.2 mostram que, mesmo para esse sistema pequeno, o MGP pode não ser detectado, como aconteceu nos Casos 5 e 6, e consequentemente o método BCU falha para essas situações.

Tabela 4.1: Sistema WSCC3, casos testados e SEPs pós-falta

Caso No.	Linha desligada	Ponto de equilíbrio estável pós-falta		
		NR [iter]	BFGS [iter]	$\theta_2^{s2}, \theta_3^{s2}$ [graus]
1	*4-5	1	5	15.51, 9.95
2	*4-6	2	7	15.40, 7.26
3	*5-7	2	12	41.71, 26.53
4	*6-9	2	10	28.12, 27.72
5	*8-7	2	9	29.21, 2.49
6	*8-9	2	9	16.51, 14.61

(*) Indica a barra em que aconteceu o curto-circuito trifásico.
 Todos os ângulos na referência do ângulo do gerador 1.

Tabela 4.2: Sistema WSCC3, cálculo de θ^{ex} e θ^{mgp} .

Caso No.	θ^{ex} [passos]	θ^{mgp} [passos]	$\theta_2^{ex}, \theta_3^{ex}$ [graus]	$\theta_2^{mgp}, \theta_3^{mgp}$ [graus]
1	25+3	13	161.20, 161.01	161.82, 157.08
2	24+4	18	158.11, 157.95	159.83, 149.53
3	28+2	15	158.55, 119.99	158.06, 128.56
4	29+2	14	137.09, 149.13	137.58, 141.38
5	24+2	-	163.83, 129.18	não encontrado
6	24+3	-	167.81, 131.75	não encontrado

Todos os ângulos na referência do ângulo do gerador 1.

A Tabela 4.3 mostra os UEPs de controle calculados usando dois pontos de partida diferentes: o ponto de saída θ^{ex} e o ponto de gradiente mínimo θ^{mgp} . Em todos os casos os UEPs de controle calculados utilizando ambas as metodologias foram os mesmos. Além disso, tal como pode ser visto na Tabela 4.3, o número de iterações requeridas pelo método Newton-Raphson foi virtualmente idêntico quando iniciado com qualquer um dos dois pontos de partida. Esses resultados confirmam a idéia de que se o ponto de saída é obtido de forma precisa, então o cálculo do MGP não é necessário para o cálculo do UEP de controle.

Tabela 4.3: Sistema WSCC3, cálculo do UEP de controle.

Caso No.	UEP de controle exato				
	partida com θ^{ex}		partida com θ^{mgp}		θ_2^u, θ_3^u [graus]
	NR [iters]	BFGS [iters]	NR [iters]	BFGS [iters]	
1	2	10	2	5	168.79, 155.51
2	2	8	1	4	161.42, 149.43
3	2	10	2	5	151.69, 127.79
4	2	10	2	8	142.24, 141.30
5	3	11	-	-	132.72, 176.80
6	3	11	-	-	146.49, 165.78
Todos os ângulos na referência do ângulo do gerador 1.					

A Tabela 4.3 também indica o desempenho do método BFGS na solução do UEP de controle, começando tanto do ponto de saída como do ponto de gradiente mínimo. Novamente foram determinados os mesmo UEPs de controle independente do ponto de partida. Apesar da grande confiabilidade do método BFGS, os resultados mostram que este método requer mais iterações que o método Newton-Raphson, sendo portanto não-competitivo para propósitos de cálculo de UEPs de controle.

Outros testes com sistemas maiores indicaram que o desempenho do método BFGS piora conforme a dimensão do sistema de potência aumenta, tanto para o cálculo do SEP pós-falta como para o cálculo do UEP de controle.

Tipicamente o método NR utiliza 2 ou 3 iterações para resolver pontos de equilíbrio de sistemas de pequeno porte e de dimensão média.

4.7.2 Sistema de teste IEEE50

Tem sido reconhecido que o cálculo do UEP de controle é muito mais difícil quando o sistema de potência está sob estresse. Nessa situação, o método BCU pode falhar devido a problemas computacionais, tal como é relatado em [TREI96]; da mesma maneira os outros métodos existentes também podem falhar diante de sistemas estressados. Para testar o desempenho da metodologia proposta aqui, os mesmos casos de contingências descritas para o sistema IEEE50 em [TREI96] foram testados (ver Tabela 4.4). Essas contingências, que consistem em curto-circuitos trifásicos em uma barra eliminados mediante o desligamento da linha sob falta, originaram falhas do método BCU.

A Tabela 4.4 mostra as componentes dos SEPs no espaço θ correspondentes aos geradores 20 e 25 que são as máquinas avançadas, assim como o número de iterações requeridas pelo método Newton-Raphson, partindo das condições do sistema pré-falta. Notar que mais dois casos de contingências (#8 e #9) foram acrescentados aos descritos em [TREI96], e correspondem a condições de operação ainda mais severas.

Tabela 4.4: Sistema IEEE50, dados dos casos de teste e SEPs pós-falta

Caso No.	Linha desligada	Pg(93)=Pg(110) [MW]	SEP pós-falta	
			iters. NR	$\theta_{20}^{s2}, \theta_{25}^{s2}$
1	*66-69	700	2	39.89, 35.71
2	*1-6	1300	3	65.07, 67.83
3	*7-6	700	3	66.99, 22.28
4	*7-6	900	3	72.98, 35.06
5	*7-6	1100	3	79.56, 48.36
6	*7-6	1300	3	86.98, 62.45
7	*7-6	1500	3	95.81, 77.96
8	*7-6	1700	3	108.18, 97.12
9	*7-6	1801.9013	7	125.47, 117.98
(*) Indica a barra onde a falta 3-fásica está localizada. θ_{25}^{s2} do Caso 1 corresponde a θ_{26}^{s2} . Todos os ângulos estão dados em graus.				

A Tabela 4.5 apresenta as componentes do ponto de saída e do ponto de gradiente mínimo correspondentes aos geradores 20 e 25, obtidos para todos os casos das contingências que estão sendo estudadas. Essa tabela também mostra o número dos passos de integração necessários para a obtenção do ponto de saída e do MGP. Para a determinação do ponto de saída integra-se numericamente a trajetória sob perturbação usando o método trapezoidal com um passo de tamanho 0.0108 s até que o primeiro cruzamento por zero de $f\tilde{\omega}$ é alcançado; em seguida os passos de interpolação linear são realizados até que o ponto de saída é detectado para uma

tolerância de 10^{-6} . O ponto MGP é calculado através da integração do sistema gradiente pós-falta usando a rotina LSODE partindo do ponto de saída. A Tabela 4.5 mostra que, ao contrário aos resultados apresentados em [TREI96], em que algumas das detecções falharam, todos os MGPs foram achados. Uma explicação para esse fato parece ser as diferenças observadas entre os pontos de saída obtidos.

Tabela 4.5: Sistema IEEE50, cálculo de θ^{ex} e θ^{mgp} .

Caso No.	θ^{ex} [passos]	θ^{mgp} [passos]	$\theta_{20}^{ex}, \theta_{25}^{ex}$ [graus]	$\theta_{20}^{mgp}, \theta_{25}^{mgp}$ [graus]
1	29+3	12	114.83, 158.63	114.86, 158.54
2	39+3	8	109.81, 133.82	109.78, 133.81
3	28+3	7	152.66, 23.57	152.60, 23.63
4	28+3	7	157.65, 38.00	157.58, 38.06
5	28+4	8	162.63, 52.61	162.57, 52.65
6	27+4	8	166.98, 67.37	166.92, 67.42
7	27+3	8	171.81, 82.48	171.74, 82.52
8	27+4	7	176.51, 97.99	176.45, 98.02
9	26+3	7	178.08, 105.96	178.01, 105.99
θ_{25} do Caso 1 corresponde a θ_{26} .				
Todos os ângulos na referência do ângulo do COI.				

A Tabela 4.6 exibe os resultados obtidos no processo de solução dos UEPs de controle e para os nove casos de contingências estudadas. Nota-se que os primeiros sete casos são os mesmos apresentados como falhas do método BCU em [TREI96]. Em todos os casos, o método Newton-Raphson partindo do ponto de saída calculou exatamente os mesmos UEPs de controle que foram calculados começando do MGP, exceto no Caso 1, em que a partida do MGP falhou e não possibilitou o cálculo do UEP de controle, e no Caso 5 em que uma combinação dos métodos BFGS e NR foi necessária para conseguir a convergência do processo iterativo de cálculo do UEP de controle. Além disso, os resultados na Tabela 4.6 indicam que o número de iterações não muda significativamente quando a solução do UEP de controle começa no ponto de saída ou no ponto de gradiente mínimo.

Muitas simulações conduziram à conclusão que uma combinação dos métodos Newton-Raphson e BFGS era uma alternativa útil para determinar UEPs de controle quando uma solução exibe uma pobre convergência ou não-convergência. A idéia é tirar vantagem das melhores características de cada método, isto é, a velocidade do método Newton-Raphson e a robustez do método BFGS. Uma boa combinação encontrada foi a iniciação do processo iterativo de solução com o método BFGS, com um eventual chaveamento ao método NR. Fazendo-se isso a robustez do método BFGS pode ser explorada para obter uma solução relaxada na direção correta, e posteriormente o processo será acelerado com o método Newton-Raphson. Contudo, o momento exato para o chaveamento depende das condições do sistema de potência e deve ser ajustado empiricamente.

Tabela 4.6: Sistema IEEE50, cálculo do UEP de controle.

Caso No.	Método BCU falha §	Iterações na solução do CUEP			CUEP exato $\theta_{20}^u, \theta_{25}^u$ [graus]
		partindo com		Método usado	
		θ^{ex}	θ^{mcp}		
1	F1	83	falhou	NR	153.57, 148.76
2	F2	6	7	NR	159.42, 163.55
3	F2	4	4	NR	185.43, 90.57
4	F2	11	9	NR	191.89, 123.69
5	F3	23+14	23+13	B+N	184.15, 134.71
6	F3	34	25	NR	174.40, 138.80
7	F3	11	11	NR	162.34, 139.00
8	-	8	7	NR	145.58, 133.18
9	-	10	9	NR	125.45, 117.95

Todos os ângulos na referência do ângulo do COL. θ_{25}^u do Caso 1 corresponde a θ_{26}^u .
 § Os primeiros 7 Casos foram considerados como falhas do método BCU em [TREI96].
 F1 - MGP achado, solução do UEP falha.
 F2 - MGP achado, solução do UEP converge ao SEP pós-falta θ^{s2} .
 F3 - MGP não foi achado, trajetória do sistema gradiente atenuado convergiu a θ^{s2} .
 B+N - Métodos BFGS e Newton-Raphson combinados.

No Caso 5 o chaveamento do método BFGS para o método Newton-Raphson foi feito quando a função objetivo $F(\theta)$ atinge o nível 100. Um critério heurístico geral seria chavear os métodos quando $F(\theta) < \frac{1}{2}F^0$, em que F^0 é o valor no ponto de partida. A Figura 4.27 ilustra o processo de convergência para o Caso 5, onde uma combinação dos métodos BFGS e Newton-Raphson foi essencial para encontrar o UEP de controle com a mesma precisão dos outros casos, independentemente se o ponto inicial usado é o ponto de saída ou o ponto de gradiente mínimo. Neste caso, o método Newton-Raphson sozinho não foi capaz de convergir para uma solução adequada dentro da tolerância 10^{-6} . Se a tolerância for relaxada o NR converge porém para uma solução de menor qualidade.

O Caso 9 é especialmente importante porque representa estresse extremo para o sistema de 50 geradores. Nesse caso as potências de saída dos geradores das barras 93 e 110 foram incrementadas até conseguir-se uma coincidência entre os valores do SEP pós-falta e do UEP de controle. Esta situação particular, porém utilizando um sistema de pequena dimensão, foi investigada previamente em [BERGG93], onde o fenômeno foi denominado como “desaparecimento do UEP”; posteriormente em [SAHA97] a coincidência do SEP e do CUEP foi chamada como “desaparecimento do SEP”. Mesmo para essa situação particular o método proposto para o cálculo do UEP de controle teve uma boa performance, conforme mostrado na Tabela 4.6. Os valores dos pontos significativos tais como o SEP de pré-falta, o ponto de saída, o SEP de pós-falta e o UEP

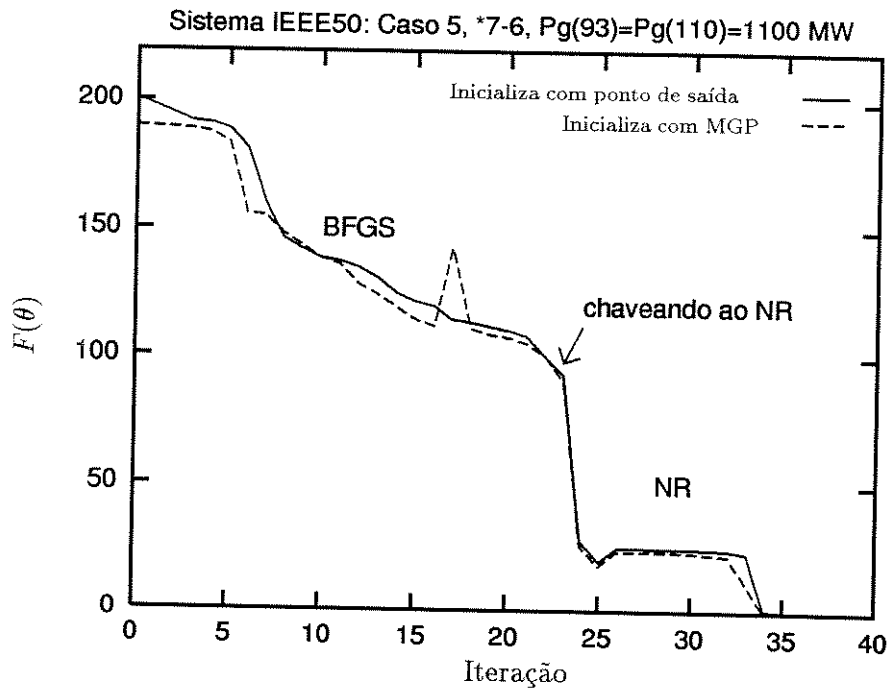


Figura 4.27: Sistema IEEE50, CUEP do Caso 5 calculado com os métodos BFGS e NR, θ^{ex} ou θ^{mgp} utilizados como valores de partida.

de controle exato, expressos no espaço θ , são apresentados na Tabela 4.7.

Na Tabela 4.8 é feita uma comparação, em termos de tempos de CPU (em segundos), entre o método BCU tal como foi implementado em [FOUA92] e o método proposto nesta pesquisa, usando uma estação de trabalho SUN Ultra 1. O ganho médio do método proposto sobre o método BCU foi de 26 % para o cálculo completo do ponto de equilíbrio instável de controle exato para os Casos 2 até 9. Em relação ao Caso 1 o método BCU não foi capaz de resolver o UEP de controle exato.

Tabela 4.7: Sistema IEEE50, Caso 9, linha 6-7* desligada em $t_{cl} = 0.1080s$.

Gerador No.	θ^{s1}	θ^{cl}	θ^{ex}	θ^{s2}	θ^u	Barra No.
1	37.03	37.64	41.10	53.38	53.36	60
2	50.70	51.01	52.70	76.34	76.33	67
3	52.93	55.29	66.38	76.13	76.11	79
4	53.24	55.29	65.77	76.15	76.13	80
5	47.09	48.28	54.30	70.66	70.64	82
6	74.91	78.52	96.22	102.50	102.48	89
7	52.86	53.44	57.57	71.62	71.60	90
8	52.34	54.78	64.79	77.00	76.98	91
9	86.54	89.58	105.10	115.28	115.26	93
10	46.59	46.72	48.67	63.04	63.03	94
11	55.62	55.63	56.32	65.65	65.64	95
12	57.55	60.76	75.88	84.20	84.18	96
13	55.30	56.15	59.80	81.83	81.82	97
14	79.04	83.63	104.70	107.21	107.19	98
15	78.62	81.12	94.51	107.24	107.21	99
16	66.07	69.27	85.34	93.23	93.21	100
17	59.95	64.21	82.78	87.32	87.30	101
18	35.59	35.07	32.81	46.08	46.07	102
19	63.05	65.07	77.42	89.92	89.90	103
20	78.58	94.91	178.08	125.47	125.45	104
21	67.13	70.14	85.34	94.58	94.56	105
22	67.37	70.33	85.31	94.73	94.71	106
23	38.96	38.96	40.31	59.80	59.78	108
24	36.01	36.25	40.63	59.22	59.20	109
25	88.71	91.49	105.96	117.98	117.95	110
26	70.68	78.88	115.70	110.50	110.48	111
27	59.46	63.57	81.77	86.79	86.77	112
28	-0.95	-1.21	-2.89	-0.91	-0.91	115
29	3.15	2.78	0.24	6.16	6.16	116
30	8.59	7.28	5.00	14.39	14.39	117
31	4.32	3.75	0.84	8.47	8.47	118
32	-36.53	-36.79	-38.11	-31.86	-31.86	119
33	18.61	17.96	16.40	36.15	36.13	121
34	37.49	37.18	35.90	57.02	57.00	122
35	41.86	41.30	42.04	65.84	65.82	124
36	-13.12	-13.35	-14.60	-6.17	-6.17	128
37	-29.86	-30.08	-31.29	-26.82	-26.82	130
38	-6.62	-6.84	-8.03	-4.80	-4.81	131
39	15.63	15.37	14.03	21.28	21.27	132
40	-5.62	-5.84	-7.00	-9.10	-9.10	134
41	36.64	36.42	35.30	32.97	32.97	135
42	11.45	11.23	10.07	7.50	7.50	136
43	-72.77	-72.99	-74.15	-83.00	-82.99	137
44	-9.53	-9.75	-10.91	-14.94	-14.94	139
45	-24.72	-24.94	-26.10	-31.91	-31.91	140
46	0.95	0.73	-0.47	-0.77	-0.76	141
47	4.86	4.63	3.41	5.14	5.14	142
48	8.42	8.17	6.60	10.87	10.87	143
49	6.52	6.30	5.13	6.67	6.67	144
50	9.49	9.27	8.11	4.93	4.93	145

Todos os ângulos em [graus] na referência do ângulo do COI.
 θ^{ex} calculado em 29 passos, (26+ 3); $t^{ex} = 0.26669s$.
 θ^{s2} calculado em 7 iterações Newton-Raphson ($F = 9.972D - 07$).
 θ^u calculado em 10 iterações Newton-Raphson ($F = 8.294D - 08$).

Tabela 4.8: Sistema IEEE50, comparação dos tempos de CPU entre o método BCU e o método proposto.

Caso No.	BCU segundo [FOUA92] t_1 [s]	Método proposto t_2 [s]	Speedup t_1/t_2
2	13.20	8.84	1.49
3	9.47	6.64	1.43
4	13.46	11.95	1.13
5	30.84	27.43	1.12
6	32.24	30.20	1.07
7	15.94	12.38	1.29
8	13.10	10.12	1.29
9	17.85	14.26	1.25

4.7.3 Testes com Fluxo de Potência Esparso

Basicamente o algoritmo consiste de um bloco interno que realiza o cálculo do fluxo de potência convencional, ao término do qual é calculada a potência da barra de folga; se essa potência não for zero então ela é alocada proporcionalmente entre os geradores e volta-se a realizar outro fluxo de potência e assim por diante. O algoritmo apresentado foi implementado considerando duas versões esparsas: 1) Fluxo de potência Newton-Raphson completo (FNR) que usa a matriz jacobiana atualizada em cada iteração, e 2) Fluxo de potência desacoplado rápido na versão BX (FBX), que usa matrizes constantes B' e B'' [VANA88]. A idéia de usar a versão desacoplada BX deve-se ao fato que esse método apesar do desacoplamento, mantém as propriedades de convergência semelhantes ao método Newton-Raphson conforme mostrado em [MONT90].

Nesse caso foram realizados testes somente para o sistema IEEE50, no qual a esparsidade é mais importante. Considerou-se um caso limite de estresse, obtido ao incrementar-se as entradas de potência dos geradores 93 e 110 até $P_g(93) = P_g(110) = 1801.9013$ MW. A perturbação simulada correspondeu a um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado ao desligar-se a linha 6 – 7*. Esse caso corresponde ao Caso 9. Para realizar os testes foi adotada uma tolerância $\epsilon_1 = 20.0$ MW para a convergência da potência da barra de folga ($P_{slk}^{(k)}$) e uma tolerância de 20.0 MW para a convergência dos erros máximos ΔP (*mismatches*) das iterações do fluxo de potência FNR (Passo 5 do algoritmo). As tolerâncias para os erros ΔP e ΔQ no método FBX foram definidos como sendo 1 MW e 1 MVar, respectivamente. O valor máximo de iterações $k_{max} = 20$ foi fixado arbitrariamente.

Nos testes foram testadas diversas barras de carga como barras de folga. Os resultados para esse caso foram obtidos usando as duas versões FNR e FBX esparsas. Na Tabela 4.9 são mostrados os UEPs de controle obtidos mediante o método esparsa FNR, enquanto que a Tabela 4.10 contém

os resultados dos UEPs de controle calculados com o método esparsa FBX, para as mesmas barras de folga. Pode-se observar que os valores dos UEPs são diferentes entre si dependendo da barra de folga escolhida, para ambos os métodos FNR e FBX. Com o método FNR foram necessários 6 ciclos de iterações (contador k). Já com o método FNR precisaram-se 5 ciclos quando a barra de folga foi a barra 1, 2 ou 8; e apenas 4 ciclos nos casos em que a barra de folga foi a barra 6, 12 ou 51.

Durante os testes foram detectados vários casos de não-convergência dependendo da escolha da barra de folga, por exemplo as barras números 20, 21, 22, 23, 129 e 138, que como barras de folga levam à divergência do método FNR.

Usando o método FBX todos os casos testados foram resolvidos com sucesso mesmo com as barras de folga acima. O sistema IEEE50 apresenta uma geração total da ordem de 350 GW e dos casos testados o pior erro da potência $P_{stk}^{(k)}$ foi 18.94 MW quando a barra de folga foi a barra número 6.

Quanto ao desempenho das versões esparsas implementadas para o cálculo do UEP, usando uma estação SUN Ultra 1, o tempo de CPU foi 0.98 s em média com o método FNR e 0.52 s com o método FBX, considerando o sistema IEEE50. Portanto o ganho médio em tempo de CPU do método FBX em relação ao método FNR foi de 1.88. Por outro lado, o ganho considerando ciclos de iterações (k) foi de 1.33 favorável ao método FBX. Para sistemas maiores, o esforço deve ser aproximadamente proporcional ao número de geradores do sistema, enquanto que com as metodologias reduzidas o esforço aumenta exponencialmente com a quantidade de geradores.

As metodologias esparsas FNR e FBX são de natureza heurística porque assumem aproximações ao estabelecer que uma barra de carga será a barra de folga, originando dessa forma erros na potência reativa dessa barra de referência e portanto as tensões e ângulos das barras do sistema são afetados. Além disso, também é heurística a forma de redistribuir a potência em excesso na barra de folga. Pode-se afirmar que uma metodologia que usa a redução da rede é exata no sentido que não introduz heurísticas no processo de solução. Desse modo os pontos de equilíbrio obtidos com métodos NR e BFGS, que usam a redução da rede aos nós internos, serão considerados como os resultados corretos (*benchmark*).

As diferenças entre os UEPs calculados com os métodos esparsos considerando diferentes barras de folga (ver Tabelas 4.9 e 4.10) não são muito grandes, porém em relação aos UEPs obtidos com o método reduzido são maiores. Com o objetivo de visualizar essas diferenças, foram plotados os perfis das componentes dos UEPs na Figura 4.28, mostrando que os geradores mais próximos da falta apresentam as maiores discrepâncias.

Tabela 4.9: Sistema IEEE50, $P_g(93) = P_g(110) = 1801.9013$ MW, linha 6-7* desligada. Componentes do ponto de equilíbrio instável $\theta^u = \theta^{s2}$ (UEP=SEP) calculado com o método FNR.

Número do gerador	Método de cálculo do UEP de controle						
	NR Reduzido	Fluxo de potência Newton-Raphson completo esparso (número da barra de folga)					
		1	2	6	8	12	51
1	53.38	35.65	35.61	32.99	33.60	32.97	34.77
2	76.34	68.20	68.15	64.62	65.49	64.60	67.01
3	76.13	67.92	67.87	64.09	64.90	64.07	66.64
4	76.15	62.11	62.05	58.21	59.09	58.18	60.82
5	70.66	72.79	72.74	69.17	69.85	69.16	71.53
6	102.50	101.29	101.23	96.59	97.63	96.55	99.72
7	71.62	89.57	89.54	87.10	87.64	87.09	88.75
8	77.00	75.15	75.10	71.04	71.93	71.01	73.76
9	115.28	106.88	106.84	102.01	103.15	101.97	105.27
10	63.04	54.57	54.53	51.96	52.56	51.94	53.70
11	65.65	55.33	55.31	53.94	54.27	53.93	54.87
12	84.20	84.96	84.89	80.41	81.41	80.37	83.42
13	81.83	101.10	101.05	97.66	98.80	97.62	99.94
14	107.21	103.38	103.32	98.75	99.77	98.71	101.88
15	107.24	99.06	98.99	93.77	95.09	93.77	97.25
16	93.23	90.23	90.17	85.53	86.58	85.49	88.67
17	87.32	86.97	86.91	82.65	83.54	82.60	85.45
18	46.08	42.28	42.27	41.50	41.99	41.49	42.10
19	89.92	81.96	81.89	76.95	78.18	76.90	80.31
20	125.47	126.40	126.33	121.40	119.75	121.41	124.68
21	94.58	93.86	93.80	89.18	90.22	89.14	92.28
22	94.73	95.04	94.98	90.53	91.48	90.50	93.49
23	59.80	61.86	61.81	58.36	59.10	58.34	60.68
24	59.22	58.83	58.77	54.80	55.67	54.77	57.48
25	117.98	110.40	110.33	105.29	106.55	105.28	108.69
26	110.50	109.77	109.71	104.92	104.49	104.93	108.12
27	86.79	86.32	86.26	81.99	82.89	81.95	84.80
28	-0.91	-2.25	-2.25	-2.13	-2.08	-2.13	-2.19
29	6.16	4.14	4.14	3.94	4.13	3.93	4.11
30	14.39	11.58	11.58	11.09	11.41	11.08	11.48
31	8.47	6.47	6.47	6.14	6.37	6.13	6.41
32	-31.86	-23.10	-23.11	-23.90	-23.72	-23.91	-23.36
33	36.15	40.92	40.88	37.99	38.62	37.97	39.94
34	57.02	56.88	56.84	54.01	54.63	54.00	55.93
35	65.84	63.98	63.93	60.49	61.23	60.47	62.82
36	-6.17	9.51	9.49	8.20	8.48	8.19	9.07
37	-26.82	-20.90	-20.91	-21.43	-21.30	-21.44	-21.08
38	-4.80	-1.59	-1.60	-1.90	-1.81	-1.90	-1.69
39	21.28	23.01	23.00	22.19	22.40	22.19	22.74
40	-9.10	-9.59	-9.58	-9.07	-9.17	-9.07	-9.42
41	32.97	29.62	29.63	30.15	30.05	30.15	29.80
42	7.50	5.52	5.53	6.11	6.00	6.11	5.72
43	-83.00	-85.78	-85.76	-84.17	-84.57	-84.16	-85.26
44	-14.94	-16.48	-16.47	-15.67	-15.85	-15.67	-16.22
45	-31.91	-33.64	-33.62	-32.59	-32.83	-32.58	-33.30
46	-0.77	-1.63	-1.62	-1.33	-1.35	-1.33	-1.52
47	5.14	5.53	5.53	5.53	5.57	5.53	5.54
48	10.87	10.60	10.59	10.38	10.51	10.38	10.55
49	6.67	8.24	8.24	8.21	8.24	8.21	8.24
50	4.93	3.47	3.48	4.15	4.01	4.16	3.69

Tabela 4.10: Sistema IEEE50, $Pg(93) = Pg(110) = 1801.9013$ MW, linha 6-7* desligada. Componentes do ponto de equilíbrio instável $\theta^u = \theta^{s2}$ (UEP=SEP) calculado com o método FBX.

Número do gerador	Método de cálculo do UEP de controle						
	NR Reduzido	Fluxo de potência Newton-Raphson BX esperso (número da barra de folga)					
		1	2	6	8	12	51
1	53.38	43.87	43.96	42.03	45.64	41.98	42.40
2	76.34	59.41	59.51	57.20	61.53	57.15	57.62
3	76.13	59.11	59.22	56.50	61.59	56.44	57.01
4	76.15	59.62	59.73	57.06	62.06	57.00	57.56
5	70.66	53.41	53.52	50.99	55.73	50.95	51.31
6	102.50	80.78	80.92	77.54	83.88	77.46	78.19
7	71.62	59.93	60.03	57.85	61.93	57.80	58.27
8	77.00	58.71	58.84	56.00	61.29	55.95	56.49
9	115.28	92.87	92.90	88.66	95.27	88.64	89.18
10	63.04	53.62	53.70	51.75	55.41	51.70	52.12
11	65.65	63.17	63.22	62.05	64.26	62.02	62.28
12	84.20	63.73	63.87	60.64	66.65	60.57	61.28
13	81.83	64.58	64.69	62.21	66.83	62.17	62.63
14	107.21	84.93	85.07	81.72	88.00	81.65	82.47
15	107.24	83.99	84.17	81.01	88.06	81.05	81.48
16	93.23	72.18	72.33	68.89	75.34	68.80	69.56
17	87.32	66.19	66.32	63.11	69.12	63.04	63.68
18	46.08	38.55	38.58	37.73	39.26	37.71	38.12
19	89.92	69.25	69.40	65.89	72.47	65.80	66.57
20	125.47	101.89	102.03	98.91	104.40	98.91	99.25
21	94.58	73.18	73.32	70.03	76.17	69.96	70.68
22	94.73	73.33	73.47	70.25	76.27	70.18	70.83
23	59.80	45.87	45.98	43.61	48.02	43.57	44.00
24	59.22	42.48	42.60	39.83	44.99	39.78	40.33
25	117.98	94.13	94.27	90.95	97.85	90.98	91.48
26	110.50	87.54	87.67	84.64	90.13	84.62	85.01
27	86.79	65.70	65.84	62.62	68.63	62.55	63.19
28	-0.91	-0.99	-0.99	-0.98	-1.01	-0.98	-0.93
29	6.16	4.14	4.15	3.87	4.37	3.87	4.03
30	14.39	10.57	10.60	10.04	11.04	10.03	10.30
31	8.47	5.75	5.77	5.37	6.08	5.36	5.56
32	-31.86	-32.85	-32.83	-33.41	-32.32	-33.42	-33.31
33	36.15	26.24	26.32	24.38	28.00	24.35	24.72
34	57.02	45.14	45.22	43.33	46.85	43.31	43.66
35	65.84	50.81	50.91	48.59	52.92	48.56	48.99
36	-6.17	-7.43	-7.39	-8.26	-6.64	-8.28	-8.12
37	-26.82	-27.45	-27.43	-27.82	-27.10	-27.82	-27.75
38	-4.80	-5.27	-5.26	-5.48	-5.06	-5.48	-5.43
39	21.28	18.25	18.27	17.70	18.77	17.69	17.81
40	-9.10	-7.12	-7.13	-6.76	-7.44	-6.76	-6.83
41	32.97	36.30	36.28	36.67	35.96	36.67	36.60
42	7.50	10.13	10.11	10.53	9.76	10.54	10.46
43	-83.00	-77.91	-77.96	-76.80	-78.93	-76.79	-77.05
44	-14.94	-11.97	-11.99	-11.41	-12.48	-11.40	-11.52
45	-31.91	-28.08	-28.11	-27.34	-28.76	-27.33	-27.50
46	-0.77	0.27	0.26	0.45	0.10	0.45	0.44
47	5.14	5.12	5.12	5.09	5.14	5.09	5.12
48	10.87	9.37	9.38	9.16	9.57	9.15	9.25
49	6.67	6.87	6.88	6.85	6.90	6.85	6.86
50	4.93	7.47	7.45	7.94	7.03	7.95	7.85

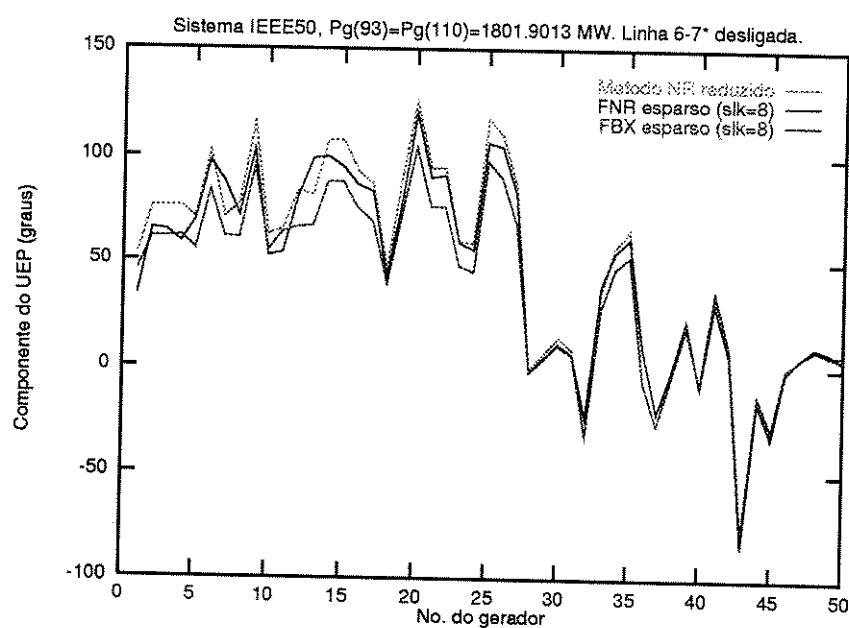


Figura 4.28: Sistema IEEE50, Caso 9. Perfil do UEP de controle calculado com o método NR reduzido e com os métodos esparsos FNR e FBX.

Capítulo 5

Conclusões

As conclusões do presente trabalho são as seguintes:

- O comportamento da energia potencial nas proximidades do tempo crítico parece ser muito mais complicada que se pensava, tendo sido detectadas ressonâncias e outros comportamentos estranhos não previstos na literatura. A partir dessas observações reformulou-se o critério para identificar o tempo crítico de eliminação a partir da detecção do primeiro máximo da energia potencial, usando simulação no domínio do tempo.
- Normalmente os geradores críticos tem sido identificados olhando-se as componentes do UEP de controle que ultrapassam 90 graus elétricos. Observando-se o comportamento das magnitudes de tensão nos terminais dos geradores, foi possível estabelecer um novo critério heurístico para identificar os geradores críticos: aqueles que apresentam durante o transitório as tensões menores que um certo limiar, por exemplo, 0.8 pu. Esse critério funcionou bem em todos os testes realizados e tem a vantagem de dispensar o conhecimento prévio do UEP de controle.
- Embora já se soubesse que a detecção precisa do ponto de saída era importante, os resultados deste trabalho mostraram que tal detecção é extremamente importante para a correta obtenção do UEP de controle. Deve-se usar controle de passo de integração e métodos eficientes e precisos, como o desenvolvido neste trabalho.
- O cálculo do ponto de gradiente mínimo (MGP) previsto no método BCU, com ou sem esparsidade, não se mostrou necessário em todos os testes realizados. Isso se deve ao cuidado na detecção do ponto de saída e no uso de métodos robustos para a obtenção do UEP de controle. Porém, outros testes devem ser realizados para melhor comprovação.
- O método Newton-Raphson, desde que modificado e com salvaguardas, mostrou-se, como era esperado, ser um método eficiente e confiável para a obtenção do UEP de controle na maioria dos casos testados. Em casos mais estressados de sistemas maiores, o método

BFGS mostrou ser um bom inicializador para o Newton-Raphson, sendo que a combinação dos dois mostrou-se de alta confiabilidade, sem comprometer a eficiência.

- Ao contrário do que tem sido mencionado na literatura, os métodos desacoplados rápidos podem ser usados com sucesso na obtenção do UEP de controle na formulação esparsa, desde que se considere a versão BX. Devem ser realizados mais estudos a fim de melhorar a qualidade dos UEPs obtidos, bem como reduzir a dependência dos resultados em relação à barra de folga escolhida.
- Tomando-se o sistema IEEE50 e estações SUN Ultra 1 como referência, observa-se que os tempos de CPU para obter a margem de estabilidade/instabilidade de uma contingência dinâmica (cerca de 15 s para a versão reduzida e menores que 10 s para versões esparsas) permitem concluir que a utilização do método baseado na função energia desenvolvido neste trabalho é computacionalmente viável na análise da estabilidade transitória de primeira oscilação.

RESUMO DOS APORTES DESTE TRABALHO

- Caracterização do comportamento da energia potencial nas proximidades do tempo crítico de eliminação.
- Implementação de uma nova versão alternativa do método BCU, com resultados que mostram maior velocidade e robustez para o cálculo de UEPs de controle de sistemas de grande porte estressados ou não.
- Desenvolvimento de uma nova metodologia para o cálculo eficiente e preciso do ponto de saída.
- Desenvolvimento de uma versão modificada do método Newton-Raphson para o cálculo de pontos de equilíbrio.
- Aplicação do método BFGS como resolvidor de pontos de equilíbrio.
- Aplicação dos métodos Newton-Raphson e BFGS para resolver pontos de equilíbrio de convergência difícil em forma cooperativa.
- Implementação de métodos esparsos baseados no fluxo de potência Newton-Raphson e fluxo de potência desacoplado rápido BX para resolver UEPs de controle.
- O programa computacional *Transtef* desenvolvido durante a pesquisa e que incorpora os algoritmos propostos.

POSSÍVEIS TRABALHOS FUTUROS

Existem várias possibilidades de trabalhos futuros relacionados com este trabalho de pesquisa.

-
- Aplicar os programas computacionais desenvolvidos para a realização de seleção de contingências, mas para isso o programa *Transtef* deve ter uma versão específica.
 - Investigar melhor e aperfeiçoar os métodos do fluxo de potência Newton-Raphson e fluxo de potência desacoplado rápido versão BX;
 - Implementar um programa de análise de segurança dinâmica *on-line* que integre os programas desenvolvidos dentro de um esquema hierárquico e considerando um ambiente de processamento distribuído.

Referências Bibliográficas

- [ABRA82] Abraham R.H. and Shaw C.D., "Dynamics - The Geometry of Behavior", Aerial Press, Inc., 1982.
- [ABU-88a] Abu-Elnaga M.M., El-Kady M.A. and Findlay R.D., "Sparse Formulation of the Transient Energy Function Method for Applications to Large-Scale Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.4, pp.1648-1654, November 1988.
- [ABU-88b] Abu-Elnaga M.M., El-Kady M.A. and Findlay R.D., "Stability Assessment of Highly Stressed Power Systems Using the Sparse Formulation of the Direct Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.4, pp.1655-1661, November 1988.
- [ANDE77] Anderson P.M. and Fouad A.A., "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- [ANDE83] Anderson P.M. and Bose A., "A Probabilistic Approach to Power System Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-102, No.8, pp.2430-2439, Aug 1983.
- [ARNO89] Arnold V.I., "Teoria da Catástrofe", tradução de: *Catastrophe Theory*, Editora da UNICAMP, Campinas, Brasil, 1989.
- [ARRI83] Arrillaga J., Arnold C.P. and Harker B.J., "Computer Modelling of Electrical Power Systems", John Wiley & Sons, 1983.
- [ARRO90] Arrowsmith D.K. and Place C.M., "An Introduction to Dynamical Systems", Cambridge University Press, Cambridge, USA, 1990.
- [ATHA79a] Athay T., Podmore R. and Virmani S., "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.2, pp.573-584, March/April 1979.
- [ATHA79b] Athay T., Sherkat V.R., Podmore R., Virmani S. and Puech C., "Transient Energy Stability Analysis", Systems Engineering for Power: Emergency Operation State Control - Section IV, U.S. Department of Energy Publication No. CONF-790904-PL, 1979.
- [AYLE58] Aylett P.D., "The Energy Integral-Criterion of Transient Stability Limits of Power Systems", Proceedings of IEE, Vol.105c, No.8, pp.527-536, Sept. 1958.

- [BALU92] Balu N., Bertram T., Bose A., Brandwajn V., Cauley G., Curtice D., Fouad A., Fink L., Lauby M., Wollenberg B. and Wrubel J., "On-Line Power System Security Analysis", Proceedings of the IEEE, Vol.80, No.2, pp.262-279, February 1992.
- [BELH93] Belhomme R., Zhao H. and Pavella M., "Power System Reduction Techniques for Direct Transient Stability Methods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.2, pp.723-729, May 1993.
- [BERGE81] Bergen A.R. and Hill D.J., "A Structure Preserving Model for Power System Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, pp.25-35, 1981.
- [BERGE86] Bergen A.R., *"Power Systems Analysis"*, Prentice-Hall, 1986.
- [BERGG93] Berggren B. and Andersson G., "On the Nature of Unstable Equilibrium Points in Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.2, pp.738-745, May 1993.
- [BILL81] Billinton R. and Kuruganty P.R.S., "Probabilistic Assessment of Transient Stability in Practical Multimachine Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, No.7, pp.3634-3641, July 1981.
- [BYRD96] Byrd R.H., Nocedal J. and Schnabel R.B., "Representations of quasi-Newton matrices and their use in limited memory methods", Technical Report NAM-03, Northwestern University, January 1996.
- [CHAD96] Chadalavada V., Vittal V., Ejebe G.C., Irisarri G.D., Tong J., Pieper G. and McMullen M., "An On-Line Contingency Filtering Scheme for Dynamic Security Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No.1, pp.153-161, Feb. 1997.
- [CHIA87] Chiang H.D., Wu F.F. and Varaiya P.P., "Foundations of Direct Methods for Power System Transient Stability Analysis", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.34, No.2, pp.160-173, February 1987.
- [CHIA88a] Chiang H.D., Hirsch M.W. and Wu F.F., "Stability Regions of Nonlinear Autonomous Dynamical Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.33, No.1, pp.16-27, January 1988.
- [CHIA88b] Chiang H.D. and Wu F.F., "Stability of Nonlinear Systems Described by a Second Order Vector Differential Equation", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.35, No.6, pp.703-711, June 1988.
- [CHIA88c] Chiang H.D., Wu F.F. and 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, pp.712-728, June 1988.
- [CHIA89a] Chiang H.D. and Thorp J.S., "The Closest Unstable Equilibrium Point Method for Power System Dynamic Security Assessment", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.36, No.9, pp.1187-1200, September 1989.

- [CHIA89b] Chiang H.D., "Study of the Existence of Energy Functions for Power Systems with Losses", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.36, No.11, pp.1423-1429, November 1989.
- [CHIA91] Chiang H.D., "Analytical Results on the Direct Methods for Power System Transient Stability Analysis", in *Control and Dynamic Systems: Advances in Theory and Application*, Academic Press, Vol.43, Part 3 of 4, pp.275-334, New York, USA, 1991.
- [CHIA93] Chiang H.D., Tong J. and Miu K.N., "Predicting Unstable Modes in Power Systems: Theory and Computations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.4, pp.1429-1437, November 1993.
- [CHIA94] Chiang H.D., Wu F.F. and Varaiya P.P., "A BCU Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.3, pp.1194-1208, August 1994.
- [CHIA95a] Chiang H.D. and Chu C.C., "Theoretical Foundation of the BCU Method for Direct Stability Analysis of Network-Reduction Power System Model with Small Transfer Conductances", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, Vol.42, No.5, pp.252-265, May 1995.
- [CHIA95b] Chiang H.D., Chu C.C. and Cauley G., "Direct Stability Analysis of Electric Power Systems Using Energy Functions: Theory, Applications, and Perspective", Proceedings of the IEEE, Vol.83, No.11, pp.1497-1529, November 1995.
- [CHIA96a] Chiang H.D. and Fekih-Ahmed L., "Quasi-Stability Regions of Nonlinear Dynamical Systems: Theory", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, Vol.43, No.8, pp.627-635, Aug. 1996.
- [CHIA96b] Chiang H.D. and Fekih-Ahmed L., "Quasi-Stability Regions of Nonlinear Dynamical Systems: Optimal Estimations", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, Vol.43, No.8, pp.636-643, Aug. 1996.
- [DEMA94] Demaree K., Athay T., Cheung K.W., Mansour Y., Vaahedi E., Chang A.Y., Corns B.R. and Garrett B.W., "An On-line Dynamic Security Analysis System Implementation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.2, pp.1716-1722, November 1994.
- [DENN83] Dennis J.E.Jr. and Schnabel B.R., *Numerical methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*, Prentice Hall Inc., USA, 1983.
- [EJEB96] Ejebe G.C., Irisarri G.D., Tinney W.F., Vittal V. and Cauley G., "A sparse formulation and implementation of the transient energy function method for dynamic security analysis", Electrical Power & Energy Systems, Vol.18, No.1, pp.3-9, 1996.
- [EL-AB66] El-Abiad A.H. and Nagappan K., "Transient Stability Regions for Multi-machine Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-85, pp.169-179, February 1966.

- [EL-KA86] El-Kady M.A. et.al., "Dynamic Security Assessment Utilizing the Transient Energy Function Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.1, No.1, pp.284-291, March 1986.
- [FONS85] Fonseca L.G.S. and Decker I.C., "Iterative Algorithm for Critical Energy Determination in Transient Stability of Power Systems", Proceedings of the IFAC Electric Energy Systems, pp.483-489, Rio de Janeiro, Brazil, 1985.
- [FOUA81a] Fouad A.A., Kruempel K.C., Mamandur K.R.C., Pai M.A., Stanton S.E. and Vittal V.; "Transient Stability Margin as a Tool for Dynamic Security Assessment", Report EL-1755, Palo Alto, CA, EPRI, March 1981.
- [FOUA81b] Fouad A.A. and Stanton S.E., "Transient Stability of a Multi-Machine Power System. Part I: Investigation of System Trajectories", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.7, pp.3408-3416, July 1981.
- [FOUA81c] Fouad A.A. and Stanton S.E., "Transient Stability of a Multi-Machine Power System. Part II: Critical Transient Energy", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.7, pp.3417-3424, July 1981.
- [FOUA82] Fouad A.A., Stanton S.E., Mamandur K.R.C. and Kruempel K.C., "Contingency Analysis Using the Transient Energy Margin Technique", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.4, pp.757-766, April 1982.
- [FOUA84] Fouad A.A., Vittal V. and Kyoo Oh T., "Critical Energy for Direct Transient Stability Assessment of a Multimachine Power System", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.8, pp.2199-2206, August 1984.
- [FOUA86] Fouad A.A., Kruempel K.C., Vittal V., Ghafurian A., Nodehi K. and Mitche J.V., "Transient Stability Program Output Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.1, No.1, pp.2-9, February 1986.
- [FOUA87] Fouad A.A., Vittal V., Rajagopal S., Carvalho V.F., El-Kady M.A., Tang C.K., Mitsche J.V. and Pereira M.V.F., "Direct Transient Stability Analysis Using Energy Functions: Application to Large Power Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.2, No.1, pp.37-44, February 1987.
- [FOUA88] Fouad A.A. and Vittal V., "The Transient Energy Function Method", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.10, No.4, pp.233-246, Oct. 1988.
- [FOUA92] Fouad A.A. and Vittal V., *"Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method"*, Prentice Hall, USA, 1992.
- [FOUA94] Fouad A.A., Zhou Q. and Vittal V., "System Vulnerability as a Concept to Assess Power System Dynamic Security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.2, pp.1009-1015, May 1994.

- [GLES66] Gless G.E., "Direct Method of Lyapunov Applied to Transient Power System Stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-85, pp.164-179, 1966.
- [GUCK83] Guckenheimer J. and Holmes P., "*Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields*", Applied Mathematical Sciences Series No.42, Springer-Verlag, New York, 1983.
- [GUPT76] Gupta C.L. and El-Abiad A.H., "Determination of the Closest Unstable Equilibrium State for Lyapunov's method in Transient Stability Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-85, No.5, pp.1699-1712, Sept/Oct 1976.
- [HEYD86] Heydt G.T., "*Computer Analysis Methods for Power Systems*", MacMillan Pub. Co., 1986.
- [HIND83] Hindmarsh A.C., "ODEPACK, A Systematized Collection of ODE Solvers", in Scientific Computing, R.S. Stepleman et.al. (eds.), North-Holland, Amsterdam, (vol.1 of IMACS Transactions on Scientific Computation), pp.55-64, 1983.
- [HIRS74] Hirsch M. and Smale S., "*Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra*", Academic Press, New York, 1974.
- [IEEE82] IEEE Committee Report, "Proposed Terms and Definitions for Power System Stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, pp.1894-1898, 1982.
- [IEEE88] IEEE Committee Report, "Dynamic Security Assessment Practices in North America", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.3, pp.1310-1321, August 1988.
- [IEEE92] IEEE Committee Report, "Transient Stability Test Systems for Direct Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.1, pp.37-43, February 1992.
- [IRIS94] Irisarri G.D., Ejebe G.C., Waight J.G. and Tinney W.F., "Efficient Solution for Equilibrium Points in Transient Energy Function Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.2, pp.693-699, May 1994.
- [KAKI78a] Kakimoto N., Ohsawa Y. and Hayashi M., "Transient Stability Analysis of Electric Power System via Lur'e Type Lyapunov Function. Part I New Critical Value for Transient Stability", Transactions of the IEE of Japan, Vol.98, No.5/6, pp.63-71, May/June 1978.
- [KAKI78b] Kakimoto N., Ohsawa Y. and Hayashi M., "Transient Stability Analysis of Electric Power System via Lur'e Type Lyapunov Function. Part II Modification of Lur'e Type Lyapunov Function with Effect of Transfer Conductances", Transactions of the IEE of Japan, Vol.98, No.5/6, pp.72-79, May/June 1978.
- [KIMB48] Kimbark E.W., "*Power System Stability*", Vol. I, John Wiley & Sons, New York, 1948.
- [KUND94] Kundur P., "*Power System Stability and Control*", McGraw Hill Text, 1994.

- [KUO 95] Kuo D.H. and Bose A., "A Generation Rescheduling Method to Increase the Dynamic Security of Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.1, pp.68-76, February 1995.
- [LEMM89] Lemmon W.W., Mamandur K.R.C. and Barcelo W.R., "Transient Stability Prediction and Control in Real-Time by QUEP", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.2, pp.627-642, May 1989.
- [LIU 88] Liu D.C. and Nocedal J., "On the Limited Memory BFGS Method for Large Scale Optimization", *Mathematical Programming* 45, pp.503-528, 1989.
- [LLAM95] Llamas A., De La Ree Lopez J., Mili L., Phadke A.G. and Thorp J.S., "Clarifications of the BCU Method for Transient Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.1, pp.210-219, February 1995.
- [LYAP1892] Lyapunov A.M., "The General Problem of the Stability of Motion", (first published in 1892) translated and edited by A.T. Fuller and published by Taylor & Francis, 1992.
- [MAGN47] Magnusson P.C., "Transient Energy Method of Calculating Stability", AIEE Transactions, Vol.66, pp.747-755, 1947.
- [MANS94] Mansour Y., Vaahedi E., Chang A.Y., Corns D.R., Garrett B.W., Demaree K., Athay T. and Cheung K., "B.C. Hydro's On-line Transient Stability Assessment (TSA) Model Development, Analysis, and Post-processing", IEEE/PES 1994 Winter Meeting, Paper 94 WM 240-2 PWRs, New York, USA, 1994.
- [MANS97] Mansour Y., Vaahedi E. and El-Sharkawi M.A., "Dynamic Security Contingency Screening and Ranking Using Neural Networks", IEEE Transactions on Neural Networks, pp.942-950, Vol.8, No.4, pp.942-950, July 1997.
- [MARI90] Maria G.A., Tang C. and Kim J., "Hybrid Transient Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.2, pp.384-393, May 1990.
- [MONT90] Monticelli A., Garcia A.V. and Saavedra O., "Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations and Testing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.4, pp.1425-1431, November 1990.
- [MICH83] Michel A.N., Fouad A.A. and Vittal V., "Power System Transient Stability Using Individual Machine Energy Functions", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.CAS-30, No.5, pp.266-276, May 1983.
- [NIEB92] Niebur D. and Germond A.J., "Power System Static Security Assessment Using the Kohonen Neural Network Classifier", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.2, pp.865-872, May 1992.
- [PAI 81] Pai M.A., "Power System Stability - Analysis by the Direct Method of Lyapunov", North Holland, Amsterdam, 1981.

- [PAI 89] Pai M.A., *“Energy Function Analysis for Power System Stability”*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1989.
- [PAI 96] Pai M.A., Laufenberg M. and Sauer P.W., “Some Clarifications in the Transient Energy Function Method”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.18, No.1, pp.65-72, 1996.
- [PALI78] Palis J. e Melo W. de, “Introdução aos Sistemas Dinâmicos”, Instituto de Matemática Pura, CNPq, Brasil, 1978.
- [PAUC89] Páucar V.L., “Análisis de la Estabilidad a Perturbación Pequeña en Sistemas de Potencia Multimáquina”, Tesis de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1989.
- [PAUC91a] Páucar V.L., Rudnick H. and González C., “Methods to Identify Generators to be Equipped with Stabilizers: Application to Longitudinal Power Systems”, *IASTED International Conference Power High Tech’91*, Tainan, Taiwan, March 1991. (pp.97-101, ACTA Press, Calgary Alta, Canada).
- [PAUC91b] Páucar V.L. y Rudnick H., “Definiciones y Conceptos Básicos de Estabilidad de Sistemas Eléctricos”, *Memorias del X CONIMERA (Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Ramas Afines)*, Lima, Perú, Setiembre de 1991.
- [PAUC92] Páucar V.L., *“Métodos Computacionales en Sistemas Eléctricos de Potencia”*, (Vols. I, II, III. Pre-edición), Perú, 1992.
- [PAUC96] Páucar V.L. y Morelato A.L., “Cálculo de Índices de Estabilidad Transitoria y Permanente mediante Redes Neurales”, *I Jornadas Iberoamericanas de Inteligencia Artificial en Sistemas Eléctricos*, Cartagena, Colombia, Noviembre 1996.
- [PAUC97] Páucar V.L. y Morelato A.L., “Procesamiento Paralelo y Distribuido para el Análisis de la Estabilidad Transitoria y Seguridad Dinámica en Sistemas Eléctricos de Potencia”, *II Jornadas Iberoamericanas de Informática en Sistemas Eléctricos*, Santa Cruz, Bolivia, Octubre 1997.
- [PAVE94] Pavella M. and Murthy P.G., *“Transient Stability of Power Systems”*, John Wiley & Sons, 1994.
- [PRAB75] Prabhakara F.S. and El-Abiad A.H., “A Simplified Determination of Transient Stability Regions for Lyapunov Methods”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No.2, pp.672-689, March/April 1975.
- [RAHI91] Rahimi F.A., Balu N.J. and Lauby M.G., “Assessing Online Transient Stability in Energy Management Systems”, *IEEE Computer Applications in Power*, pp.44-49, USA, July 1991.
- [RAHI93] Rahimi F.A., Lauby M.G., Wrubel J.N. and Lee K.L., “Evaluation of the Transient Energy Function Method for On-line Dynamic Security Assessment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, No.2, pp.497-507, May 1993.

- [RIBB81] Ribbens-Pavella M., Murthy P.G. and Horward J.L., "The acceleration approach to practical transient stability domain estimation in power systems", Proc. 20th IEEE Conf. Decision and Contr., pp.471-477, San Diego, CA, Dec.16-18, 1981.
- [RIBB85] Ribbens-Pavella M. and Evans F.J., "Direct Methods for Studying Dynamics of Large-scale Electric Power Systems - A Survey", Automatica, Vol.21, No.1, pp.1-21, Great Britain, 1985.
- [SAHA97] Saha S., Fouad A.A., Kliemann W.H. and Vittal V., "Stability Boundary Approximation of a Power System Using the Real Norm Form of Vector Fields", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No.2, pp.797-802, May 1997.
- [SASS71] Sasson A.M., Trevino C. and Aboytes F., "Improved Newton's Load Flow Through a Minimization Technique", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, pp.1974-1981, Sept/Oct 1971.
- [SOBA89] Sobajic D.J. and Pao Y.H., "Artificial Neural-Net Based Dynamic Security Assessment for Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.1, pp.220-228, Feb. 1989.
- [TAVO72a] Távora C.J. and Smith O.J.M., "Characterization of Equilibrium and Stability in Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp.1127-1130, May/June 1972.
- [TAVO72b] Távora C.J. and Smith O.J.M., "Equilibrium Analysis of Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp.1131-1137, May/June 1972.
- [TAVO72c] Távora C.J. and Smith O.J.M., "Stability Analysis of Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp.1138-1145, May/June 1972.
- [TONG93] Tong J., Chiang H.D. and Conneen T.P., "A Sensitivity-Based BCU Method for Fast Derivation of Stability Limits in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.4, pp.1418-1428, November 1993.
- [TOUM86] Toumi B., Dhifaoui R., Van Cutsem T. and Ribbens-Pavella M., "Fast Transient Stability Assessment Revisited", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.1, No.2, pp.211-220, May 1986.
- [TREI96] Treinen R.T., Vittal V. and Kliemann W., "An Improved Technique to Determine the Controlling Unstable Equilibrium Point in a Power System", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, Vol.43, No.4, pp.313-323, April 1996.
- [VANA88] van Amerongen R.A.M., "A General-Purpose Version of the Fast Decoupled Load-flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.2, pp.760-770, May 1989.

- [VARA85] Varaiya P.P., Wu F.F. and Chen R.L., "Direct Methods for Transient Stability Analysis of Power Systems: Recent Results", *Proceedings of the IEEE*, Vol.73, pp.1703-1715, December 1985.
- [VITT86] Vittal V. and Michel A.N., "Stability and Security Assessment of a Class of Systems Governed by Lagrange's Equations with Application to Multi-Machine Power Systems", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol.CAS-33, No.6, pp.623-635, June 1986.
- [VITT88] Vittal V., Rajagopal S., El-Kady M.A., Vaahedi E., Fouad A.A. and Carvalho V.F., "Transient Stability Analysis of Stressed Power Systems Using the Transient Energy Function Method", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.3, No.1, pp.239-244, February 1988.
- [VITT89] Vittal V., Zhou E., Hwang C. and Fouad A.A., "Derivation of Stability Limits Using Analytical Sensitivity of the Transient Energy Margin", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.PWRS-4, pp.1363-1372, November 1989.
- [VITT91] Vittal V., Prabhu G.M. and Swee Lian Lim, "A Parallel Computer Implementation of Power System Transient Stability Assessment Using the Transient Energy Function Method", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.6, No.1, pp.167-173, February 1991.
- [WEHE89] Wehenkel L., Van Cutsem Th. and Ribbens-Pavella M., "An Artificial Intelligence Framework for on-line Transient Stability Assessment of Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.4, No.2, pp.789-800, May 1989.
- [WOOD96] Wood A.J. and Wollenberg B.F., "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, 1996.
- [WU 88] Wu F.F., Tsai Y.-K. and Yu Y.-X., "Probabilistic Steady-State and Dynamic Security Assessment", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.3, No.1, pp.1-9, February 1988.
- [XUE89] Xue Y. and Pavella M., "Extended equal-area criterion: an analytical ultra-fast method for transient stability assessment and preventive control of power systems", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol.11, No.2, pp.131-149, April 1989.
- [ZABO88] Zaborszky J., Huang G., Zheng B. and Leung T.C., "On the Phase Portrait of a Class of Large Nonlinear Dynamic Systems Such as the Power System", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.33, No.1, pp.4-15, January 1988.

Apêndice A

Dados dos Sistemas de Teste

A.1 Sistema WSCC3

Esse sistema é composto de 3 geradores, 9 barras, 11 ramos e 3 cargas, sendo um equivalente reduzido de um sistema de potência real do *Western System Coordinating Council*. Foi proposto por Anderson & Fouad em [ANDE77]. A Figura A.1 mostra o diagrama unilinear. Na Tabela A.1 tem-se o estado do caso base, e na Tabela A.2 os dados dos geradores e a condição inicial.

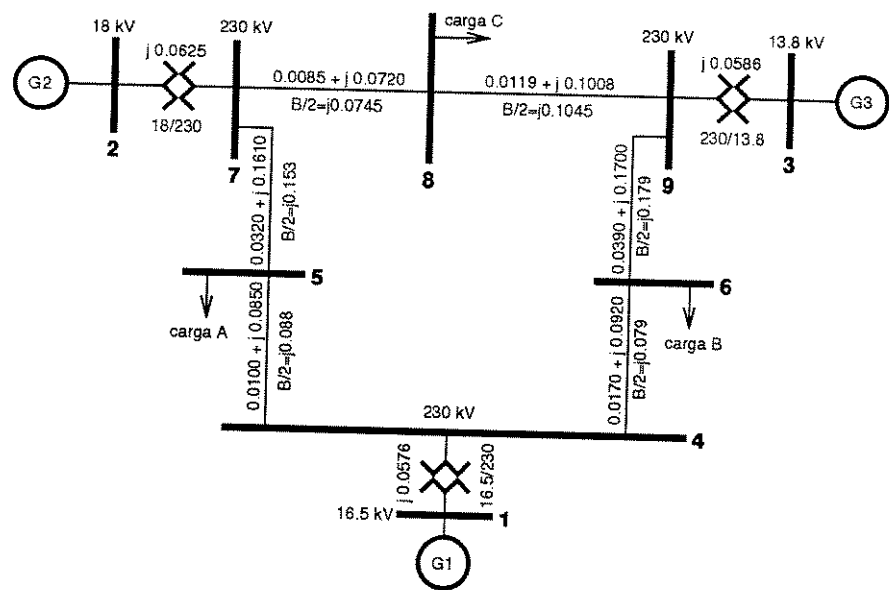


Figura A.1: Diagrama unilinear e dados da rede elétrica do sistema WSCC3.

Tabela A.1: Estado do caso base do sistema WSCC3.

Barra nome	tipo	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	P-inje. [MW]	Q-inje. [MVar]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pc [MW]	Qc [MVar]
1	3	1.0400	0.000	71.64	27.05	71.64	27.05	0.00	0.00
2	2	1.0250	9.280	163.00	6.65	163.00	6.65	0.00	0.00
3	2	1.0250	4.665	85.00	-10.86	85.00	-10.86	0.00	0.00
4	0	1.0258	-2.217	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0	0.9956	-3.989	-125.00	-50.00	0.00	0.00	125.00	50.00
6	0	1.0127	-3.687	-90.00	-30.00	0.00	0.00	90.00	30.00
7	0	1.0258	3.720	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0	1.0159	0.728	-100.00	-35.00	0.00	0.00	100.00	35.00
9	0	1.0324	1.967	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela A.2: Dados dos geradores e condição inicial do sistema WSCC3.

Gerador No.	Parâmetros dos Geradores		Condição Inicial				Barra No.
	H [MWs/MVA]	x_d' [pu]	Pm^0 [MW]	Tensão Interna			
				$ E $ [pu]	δ [graus]	θ^{s1} [graus]	
1	23.64	0.0608	71.6	1.0566	2.27	-4.37	1
2	6.40	0.1198	163.0	1.0502	19.73	13.09	2
3	3.01	0.1813	85.0	1.0170	13.17	6.52	3

A.2 Sistema WSCC4

É uma versão estendida do sistema WSCC3, tendo sido proposto na referência [FOUA81a] e contém 4 geradores, 11 barras, 12 ramos e 3 cargas. Na Tabela A.3 tem-se o estado do caso base.

Tabela A.3: Estado do caso base do sistema WSCC4.

Barra nome	tipo	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	P-inje. [MW]	Q-inje. [MVar]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pc [MW]	Qc [MVar]
1	3	1.0400	0.000	226.87	83.08	226.87	83.08	0.00	0.00
2	2	1.0350	3.813	160.00	43.96	160.00	43.96	0.00	0.00
3	2	1.0350	-0.848	100.00	36.06	100.00	36.06	0.00	0.00
4	0	1.0019	-7.205	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0	0.9693	-11.776	-200.00	-80.00	0.00	0.00	200.00	80.00
6	0	0.9635	-14.185	-230.00	-77.00	0.00	0.00	230.00	77.00
7	0	1.0131	-1.659	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0	0.9964	-3.609	-200.00	-70.00	0.00	0.00	200.00	70.00
9	0	1.0162	-4.042	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0	1.0280	9.835	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	2	1.0350	15.011	160.00	19.25	160.00	19.25	0.00	0.00

Os dados dos geradores considerando modelo clássico e a condição de operação inicial são mostrados na Tabela A.4. Na Figura A.2 tem-se o diagrama unifilar.

Tabela A.4: Dados dos geradores e condição inicial do sistema WSCC4.

Gerador No.	Parâmetros dos Geradores		Condição Inicial				Barra No.
	H	x_d'	P_m^0	Tensão Interna			
	[MWs/MVA]	[pu]	[MW]	E [pu]	δ [graus]	θ^{s1} [graus]	
1	23.64	0.0608	226.9	1.0966	6.95	-4.08	1
2	6.40	0.1198	160.0	1.1016	13.49	2.47	2
3	3.01	0.1813	100.0	1.1120	8.21	-2.81	3
4	6.40	0.1198	160.0	1.0734	24.95	13.92	11

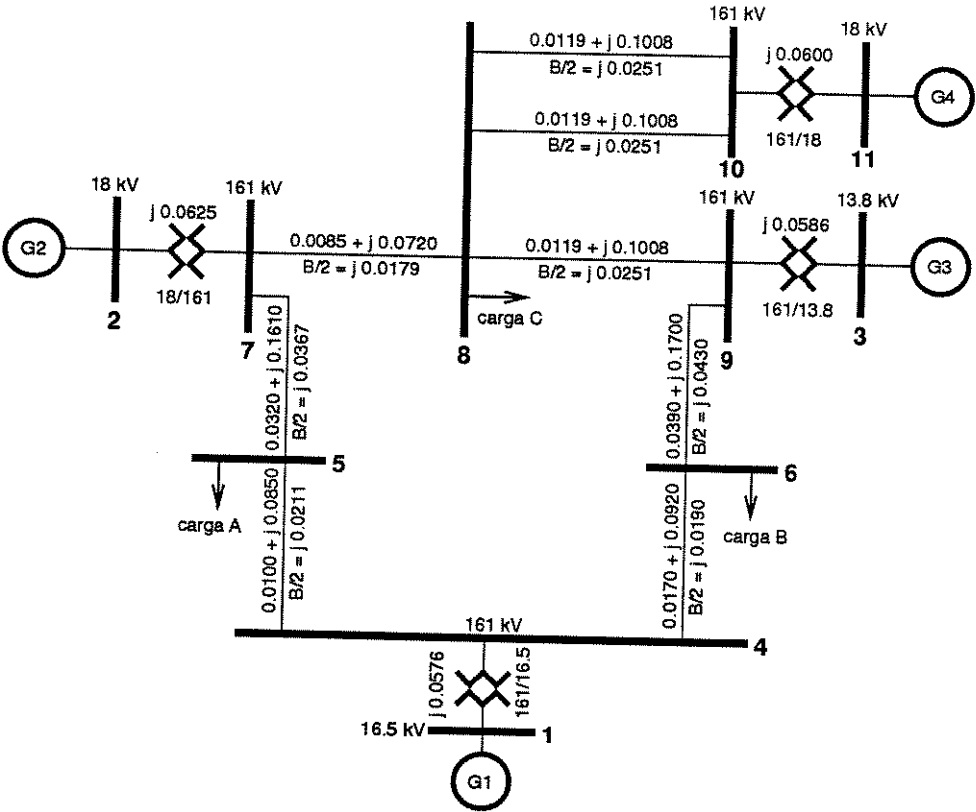


Figura A.2: Diagrama unilinear e dados da rede elétrica do sistema WSCC4.

A.3 Sistema ABIAD4

Esse sistema de potência com 4 geradores, 6 barras, 7 ramos e 3 cargas, tendo sido proposto na referência [EL-AB66]. Na Figura A.2 tem-se o diagrama unifilar e os dados da rede elétrica. Na Tabela A.5 é mostrado o estado do caso base e na Tabela A.6 apresentam-se os dados dos geradores para o modelo clássico e a condição de operação inicial.

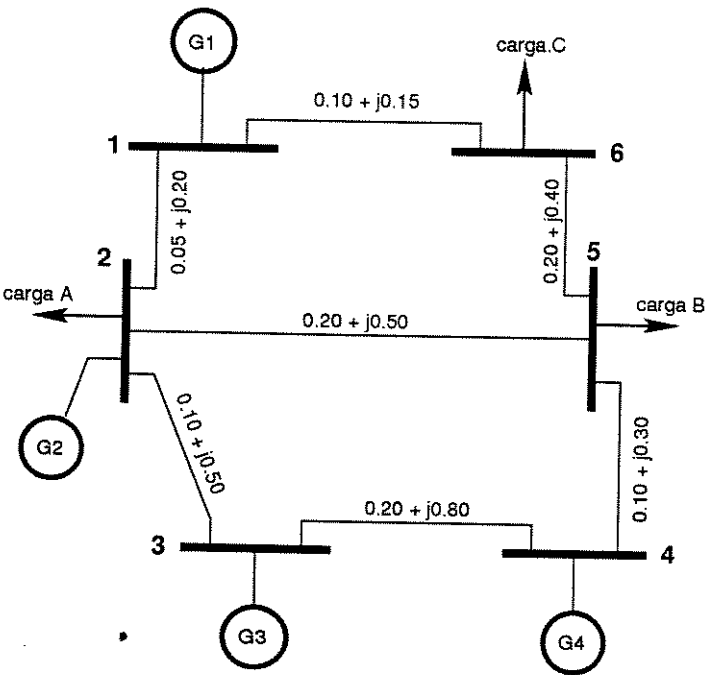


Figura A.3: Diagrama unifilar e dados da rede elétrica do sistema ABIAD4.

Tabela A.5: Estado do caso base do sistema ABIAD4.

Barra nome	tipo	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	P-inje. [MW]	Q-inje. [MVar]	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pc [MW]	Qc [MVar]
1	SLK	1.0000	0.000	33.23	9.24	33.23	9.24	0.00	0.00
2	PV	1.0020	-0.120	-10.00	-5.32	10.00	4.68	20.00	10.00
3	PV	1.0840	4.611	30.00	20.27	30.00	20.27	0.00	0.00
4	PV	1.0250	1.420	20.00	9.88	20.00	9.88	0.00	0.00
5	PQ	0.9555	-2.798	-40.00	-15.00	0.00	0.00	40.00	15.00
6	PQ	0.9527	-2.303	-30.00	-10.00	0.00	0.00	30.00	10.00

Tabela A.6: Dados dos geradores e condição inicial do sistema ABIAD4.

Gerador No.	Parâmetros dos Geradores				Condição Inicial				Barra No.
	H	x_d'	D	D/M	P_m^0	Tensão Interna			
	[MWs/MVA]	[pu]	[pu]	[MVA/MWs]	[MW]	E [pu]	δ [graus]	θ^{s1} [graus]	
1	100.00	0.0040	75.350	0.377	33.2	1.0004	0.08	-0.49	1
2	1.50	1.0000	1.130	0.377	10.0	1.0534	5.32	4.75	2
3	3.00	0.5000	2.260	0.377	30.0	1.1856	11.31	10.74	3
4	2.00	0.4000	1.508	0.377	20.0	1.0664	5.62	5.05	4

A.4 Sistema CHIANG3

Esse sistema de teste foi proposto por Chiang e Thorp na referência [CHIA89a], possui três máquinas síncronas e a máquina 3 é usada como referência. É utilizado o modelo clássico da máquina síncrona sem perdas.

CASO 1: SISTEMA COM CARGA LEVE (Sistema CHIANG3)

As equações do sistema original são as seguintes:

$$\begin{aligned}
 \dot{\delta}_1 &= \omega_1 \\
 \dot{\omega}_1 &= -\text{sen}\delta_1 - 0.5\text{sen}(\delta_1 - \delta_2) - 0.3\omega_1 + 0.01 \\
 \dot{\delta}_2 &= \omega_2 \\
 \dot{\omega}_2 &= -0.5\text{sen}\delta_2 - 0.5\text{sen}(\delta_2 - \delta_1) - 0.3\omega_2 + 0.05
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

em que δ_1 e δ_2 são os ângulos das máquinas 1 e 2, sendo a referência o ângulo da máquina 3, os ângulos serão dados em radianos; ω_1 e ω_2 são as velocidades angulares das máquinas 1 e 2 em relação à velocidade da máquina 3.

O correspondente sistema reduzido é dado por,

$$\begin{aligned}
 \dot{\delta}_1 &= -\text{sen}\delta_1 - 0.5\text{sen}(\delta_1 - \delta_2) + 0.01 \\
 \dot{\delta}_2 &= -0.5\text{sen}\delta_2 - 0.5\text{sen}(\delta_2 - \delta_1) + 0.05
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

A função de energia transitória V e a função de energia potencial V_{EP} para o sistema A.1 são dadas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$V(\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2) = \omega_1^2 + \omega_2^2 - 2 \cos \delta_1 - \cos \delta_2 - \cos(\delta_1 - \delta_2) - 0.02\delta_1 - 0.1\delta_2 \tag{A.3}$$

$$V_{EP}(\delta_1, \delta_2) = -2 \cos \delta_1 - \cos \delta_2 - \cos(\delta_1 - \delta_2) - 0.02\delta_1 - 0.1\delta_2 \tag{A.4}$$

O ponto de equilíbrio estável pós-falta é $X_s = (\delta_1^s, \omega_1^s, \delta_2^s, \omega_2^s) = (0.0279, 0, 0.0637, 0)$, e a sua energia potencial é $V_{EP}(X_s) = -4.0035pu$.

CASO 2: SISTEMA SOB ESTRESSE (Sistema CHIANG3e)

As equações do sistema original são as seguintes:

$$\begin{aligned}
 \dot{\delta}_1 &= \omega_1 \\
 \dot{\omega}_1 &= -\text{sen}\delta_1 - 0.5\text{sen}(\delta_1 - \delta_2) - 0.3\omega_1 + 0.06 \\
 \dot{\delta}_2 &= \omega_2 \\
 \dot{\omega}_2 &= -0.5\text{sen}\delta_2 - 0.5\text{sen}(\delta_2 - \delta_1) - 0.3\omega_2 + 0.56
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

O correspondente sistema reduzido é dado por,

$$\begin{aligned}
 \dot{\delta}_1 &= -\text{sen}\delta_1 - 0.5\text{sen}(\delta_1 - \delta_2) + 0.06 \\
 \dot{\delta}_2 &= -0.5\text{sen}\delta_2 - 0.5\text{sen}(\delta_2 - \delta_1) + 0.28
 \end{aligned} \tag{A.6}$$

A função de energia transitória V e a função de energia potencial V_{EP} para o sistema A.1 são dadas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$V(\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2) = \omega_1^2 + \omega_2^2 - 2 \cos \delta_1 - \cos \delta_2 - \cos(\delta_1 - \delta_2) - 0.12\delta_1 - 0.56\delta_2 \tag{A.7}$$

$$V_{EP}(\delta_1, \delta_2) = -2 \cos \delta_1 - \cos \delta_2 - \cos(\delta_1 - \delta_2) - 0.12\delta_1 - 0.56\delta_2 \tag{A.8}$$

O ponto de equilíbrio estável pós-falta é $X_s = (\delta_1^s, \omega_1^s, \delta_2^s, \omega_2^s) = (0.16190, 0, 0.36570, 0)$.

A.5 Sistema IEEE17

É um sistema que corresponde a um sistema de potência do estado de Iowa dos Estados Unidos, sendo composto de 17 geradores, 162 barras e 284 ramos (entre linhas de transmissão e transformadores). Tem sido adotado como sistema de teste padrão do IEEE porque exibe um comportamento dinâmico complexo, o que possibilita um bom teste para os métodos diretos de estabilidade transitória [IEEE92]. Os dados das máquinas síncronas estão na Tabela A.7, na base de 100 MVA. A informação para obter os dados da rede elétrica está indicada em [IEEE92].

A.6 Sistema IEEE50

É um sistema de 50 geradores, 145 barras e 453 ramos (linhas de transmissão mais transformadores), tendo sido proposto na referência [IEEE92] como um sistema de teste para estudos de estabilidade transitória com métodos diretos. Apresenta uma diversidade de características dinâmicas para vários níveis de carga. Na Tabela A.8 estão incluídos os dados dos geradores utilizando o modelo clássico, enquanto que os dados da rede elétrica podem ser obtidos conforme é indicado em [IEEE92].

Tabela A.7: Dados das máquinas síncronas do sistema IEEE17.

Número do gerador	Número da barra	Parâmetros dos geradores	
		H (s)	x_d' (pu)
1	3	100.00	0.0040
2	6	34.56	0.0437
3	15	80.00	0.0100
4	27	80.00	0.0050
5	73	16.79	0.0507
6	76	32.49	0.0206
7	99	6.65	0.1131
8	101	2.66	0.3115
9	108	29.66	0.0535
10	114	5.00	0.1770
11	118	11.31	0.1049
12	121	19.79	0.0297
13	124	200.00	0.0020
14	125	200.00	0.0020
15	126	100.00	0.0040
16	130	28.60	0.0559
17	131	20.66	0.0544

Tabela A.8: Dados das máquinas síncronas do sistema IEEE50.

No.do gerador	No. da barra	Parâmetros dos geradores		No.do gerador	No. da barra	Parâmetros dos geradores	
		H (s)	x_d' (pu)			H (s)	x_d' (pu)
1	60	1.41	0.4769	26	111	73.85	0.0122
2	67	52.18	0.0213	27	112	12.28	0.0924
3	79	6.65	0.1292	28	115	97.33	0.0024
4	80	1.29	0.6648	29	116	105.50	0.0022
5	82	2.12	0.5291	30	117	102.16	0.0017
6	89	20.56	0.0585	31	118	162.74	0.0014
7	90	0.76	1.6000	32	119	348.22	0.0002
8	91	1.68	0.3718	33	121	116.54	0.0017
9	93	115.04	0.0240	34	122	39.24	0.0089
10	94	17.34	0.0839	35	124	116.86	0.0017
11	95	5.47	0.1619	36	128	503.87	0.0001
12	96	2.12	0.4824	37	130	230.90	0.0010
13	97	5.49	0.2125	38	131	1101.72	0.0001
14	98	13.96	0.0795	39	132	120.35	0.0016
15	99	17.11	0.1146	40	134	802.12	0.0003
16	100	7.56	0.1386	41	135	232.63	0.0008
17	101	12.28	0.0924	42	136	2018.17	0.0001
18	102	78.44	0.0135	43	137	469.32	0.0004
19	103	8.16	0.1063	44	139	2210.20	0.0001
20	104	73.85	0.0122	45	140	899.19	0.0003
21	105	84.39	0.0208	46	141	1474.33	0.0001
22	106	56.26	0.0312	47	142	950.80	0.0003
23	108	30.43	0.0248	48	143	204.30	0.0023
24	109	2.66	0.2029	49	144	443.22	0.0004
25	110	115.04	0.0240	50	145	518.08	0.0018

Apêndice B

Componentes das matrizes $[J]$ e $[G_k]$

Considere-se a função não-linear $f_i(\theta)$ como a função de potência acelerante da máquina i de um sistema de n geradores. O número de variáveis independentes da função $f_i(\theta)$ é $n-1$ porque o n -ésimo ângulo pode ser definido em função dos $n-1$ ângulos anteriores; então $\theta \in \mathbb{R}^{n-1}$ é uma opção válida na formulação que usa como referência o COI.

$$f_i(\theta) = Pm_i - Pe_i(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(\theta) \quad i = 1, \dots, n$$

COMPONENTES DA MATRIZ JACOBIANA $J(\theta)$

A matriz Jacobiana $J(\theta)$ de $f_i(\theta)$ é expressa da seguinte maneira:

$$J \equiv [J_{ij}] = \left[\frac{\partial f_i}{\partial \theta_j} \right]; \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n-1 \quad (B.1)$$

A expressão de um termo geral da matriz Jacobiana de $f_i(\theta)$ é a seguinte:

$$\frac{\partial f_i}{\partial \theta_j} = -\frac{\partial Pe_i}{\partial \theta_j} - \frac{M_i}{M_T} \frac{\partial P_{COI}}{\partial \theta_j} \quad (B.2)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \theta_i} = -\frac{\partial Pe_i}{\partial \theta_i} - \frac{M_i}{M_T} \frac{\partial P_{COI}}{\partial \theta_i} \quad (B.3)$$

A seguir são dadas as equações (revisadas) das primeiras derivadas parciais necessárias na obtenção de cada termo da matriz Jacobiana [FOUA92]. Note-se que a dimensão da matriz Jacobiana é $n \times (n-1)$, isso significa que nos termos do lado esquerdo das equações das primeiras derivadas, os subscritos variam do seguinte modo: $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n-1$, além disso considera-se que $i \neq j$.

Definindo:

$$d(\theta_i, \theta_j) = C_{ij} \cos \theta_{ij} - D_{ij} \sin \theta_{ij}$$

$$\frac{\partial P e_i}{\partial \theta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} d(\theta_i, \theta_j) + d(\theta_i, \theta_n) \left[1 + \frac{M_i}{M_n} \right] \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{\partial P e_i}{\partial \theta_j} = -d(\theta_i, \theta_j) + d(\theta_i, \theta_n) \left[\frac{M_i}{M_n} \right] \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{\partial P e_n}{\partial \theta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} d(\theta_i, \theta_j) \left[\frac{M_i}{M_n} \right] - d(\theta_n, \theta_i) \left[1 + \frac{M_i}{M_n} \right] \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\partial P_{COI}}{\partial \theta_i} = -2 \left\{ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} D_{ij} \sin \theta_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} D_{jn} \sin \theta_{jn} \left[\frac{M_i}{M_n} \right] + D_{in} \sin \theta_{in} \left[1 + \frac{M_i}{M_n} \right] \right\} \quad (\text{B.7})$$

COMPONENTES DA MATRIZ HESSIANA $G_k(\theta)$

A matriz Hessiana $G_k(\theta)$ da função $f_k(\theta)$ é definida por:

$$G_k(\theta) = \left[\frac{\partial^2 f_k}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right]; \quad i, j = 1, \dots, n-1; \quad k = 1, \dots, n$$

em que k refere-se ao k -ésimo gerador, os subscritos i, j indicam o elemento (i, j) da matriz Hessiana G_k .

A seguir as equações (revisadas) para calcular-se as segundas derivadas necessárias para determinar a matriz Hessiana de $f_i(\theta)$ [FOUA92]. Em todas elas se considera que nas expressões do lado esquerdo os subscritos i, j, k são diferentes entre si e têm seus limites definidos por: $i, j, k = 1, \dots, n-1$.

Definindo:

$$e(\theta_i, \theta_j) = -D_{ij} \cos \theta_{ij} - C_{ij} \sin \theta_{ij}$$

$$\frac{\partial^2 P e_i}{\partial \theta_i \partial \theta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} e(\theta_i, \theta_j) + e(\theta_i, \theta_n) \cdot \left[1 + \frac{M_i}{M_n} \right]^2 \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{\partial^2 P e_i}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = -e(\theta_i, \theta_j) + e(\theta_i, \theta_n) \cdot \left[1 + \frac{M_i}{M_n}\right] \frac{M_j}{M_n} \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{\partial^2 P e_k}{\partial \theta_i \partial \theta_i} = e(\theta_k, \theta_i) + e(\theta_k, \theta_n) \cdot \left[\frac{M_i}{M_n}\right]^2 \quad (\text{B.10})$$

$$\frac{\partial^2 P e_k}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = e(\theta_k, \theta_n) \frac{M_i}{M_n} \frac{M_j}{M_n} \quad (\text{B.11})$$

$$\frac{\partial^2 P e_n}{\partial \theta_i \partial \theta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} e(\theta_n, \theta_j) \left[\frac{M_i}{M_n}\right]^2 + e(\theta_n, \theta_i) \left[1 + \frac{M_i}{M_n}\right]^2 \quad (\text{B.12})$$

$$\frac{\partial^2 P e_n}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = \frac{M_i M_j}{M_n^2} \left\{ \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^{n-1} e(\theta_n, \theta_k) + e(\theta_n, \theta_i) \left[1 + \frac{M_n}{M_i}\right] + e(\theta_n, \theta_j) \left[1 + \frac{M_n}{M_j}\right] \right\} \quad (\text{B.13})$$

$$\frac{\partial^2 P_{COI}}{\partial \theta_i \partial \theta_i} = 2 \left\{ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} D_{ij} \cos \theta_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} D_{jn} \cos \theta_{jn} \left[\frac{M_i}{M_n}\right]^2 + D_{in} \cos \theta_{in} \left[1 + \frac{M_i}{M_n}\right]^2 \right\} \quad (\text{B.14})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P_{COI}}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = 2 \left\{ -D_{ij} \cos \theta_{ij} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^{n-1} D_{kn} \cos \theta_{kn} \left[\frac{M_i M_j}{M_n^2}\right] \right. \\ \left. + D_{in} \cos \theta_{in} \left[1 + \frac{M_i}{M_n}\right] \left[\frac{M_j}{M_n}\right] + D_{jn} \cos \theta_{jn} \left[1 + \frac{M_j}{M_n}\right] \left[\frac{M_i}{M_n}\right] \right\} \quad (\text{B.15}) \end{aligned}$$

Apêndice C

O Programa Computacional “Transtef”

O programa computacional *Transtef* (*Transient stability program using the transient energy function method*) tem sido escrito na linguagem Fortran 77 e está orientado à análise da estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica. *Transtef* foi especificamente desenvolvido pelo autor para testar os algoritmos e metodologias propostas neste trabalho; além disso incorpora outros métodos e procedimentos existentes na literatura relacionada com a estabilidade transitória usando métodos diretos TEF. A versão atual do programa está rodando nas estações SUN da rede de computadores do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica da UNICAMP, que opera sob o sistema operacional Solaris 2.5.1 (UNIX). Não obstante, a versão pode ser facilmente transportada para outros ambientes computacionais. A opção de utilizar a linguagem Fortran 77 baseia-se no fato que o Fortran é uma linguagem científica simples e eficiente que conta com uma adequada biblioteca computacional no mundo, além do mais permite a utilização de rotinas escritas em linguagem C e C++.

No desenvolvimento do código do programa têm sido adotado o critério da programação estruturada com a finalidade de obter um programa computacional com características modulares. Segundo isso é possível acrescentar ou modificar o programa em forma eficiente. Assim por exemplo, o método trapezoidal implícito de integração numérica das equações diferenciais corresponde apenas a uma subrotina, portanto pode-se acrescentar mais outros métodos de integração numérica em forma de subrotinas sem ter que alterar a estrutura do programa.

Transtef possui duas opções para analisar a estabilidade transitória de sistemas de potência multi-máquina:

1. Análise convencional considerando a simulação no domínio do tempo.
2. Análise direta mediante a função de energia transitória.

A modelagem adotada no programa corresponde ao modelo clássico da máquina síncrona, as cargas são consideradas como modelos de potência constante, a rede elétrica é representada pela matriz admitância nodal e é reduzida aos nós internos somente para realizar a análise da função de energia. Se for estudada a estabilidade passo a passo a rede elétrica não é mais reduzida e mantém a sua esparsidade.

O programa na sua versão atual está dimensionado para 200 geradores, 1665 barras e 2351 linhas de transmissão. Embora esses parâmetros possam ser alterados, a aplicação da versão presente não é recomendada para estudos de sistemas muito grandes que possuem mais de 200 geradores, pois pode-se comprometer a eficiência e confiabilidade da metodologia reduzida adotada. A versão esparsa do programa *Transtef* (que calcula o UEP de controle via o fluxo de potência Newton-Raphson ou fluxo de potência desacoplado rápido BX preservando a esparsidade da matriz Y) permite vencer essas dificuldades de dimensionamento e analisar os sistemas de grande escala com uma maior eficiência computacional, aproximadamente proporcional à dimensão do sistema.

Os tempos de CPU verificados nas estações SUN Ultra 1, quando é utilizado o sistema de teste IEEE50, estão tipicamente entre 10 e 15 segundos para um estudo completo de estabilidade com o método TEFF. O tempo de CPU para rodar o fluxo de potência é quase desprezível, ≈ 0.35 s. Todos esses tempos levam em conta tempos gastos em I/O (*input/output*) ou leitura/escrita de arquivos.

FUNÇÕES PRINCIPAIS DO PROGRAMA *Transtef*

- Realiza a simulação numérica passo a passo das equações de oscilação do sistema sob perturbação e pós-perturbação e calcula os ângulos elétricos e as velocidades angulares dos rotores dos geradores.
- Caso tenha sido especificado, calcula a energia transitória em cada passo da integração numérica.
- Calcula o ponto de equilíbrio estável pós-perturbação.
- Calcula o ponto de equilíbrio instável de controle pelo método BCU ou pelo método proposto neste trabalho.
- Determina a energia crítica, a energia no instante de eliminação de uma perturbação, a energia no ponto de saída, a energia no ponto de gradiente mínimo e a energia cinética corrigida.
- Calcula a margem de energia transitória, normalizada e não-normalizada, e determina se o sistema é estável ou não. Além disso, pode calcular várias margens de energia para diferentes tempos de eliminação.
- Calcula o tempo crítico de eliminação.

Deve ser observado que nem todas as funções são sempre ativadas, algumas delas são alternativas dependendo das opções utilizadas.

ENTRADA DO PROGRAMA

O programa começa lendo um arquivo fornecido por um programa convencional de fluxo de potência que contém o estado em regime permanente do sistema pré-perturbação; no caso presente o programa lê o arquivo "estado.sai" fornecido pela saída dos programas de fluxo potência "nr" ou "nrboxf" implementados pelo autor, os quais podem ler arquivos de dados nos formatos PECO ou CDF. Em seguida *Transtef* procede a leitura dos seguintes arquivos contendo : a) dados das barras, topologia e parâmetros da rede elétrica, nos formatos PECO ou CDF; b) parâmetros das máquinas síncronas e contingência a ser estudada em formato EPRI; e c) opções de estudo da estabilidade e opções para plotagem de resultados.

SAÍDA DO PROGRAMA

A saída do programa é múltipla e variada e pode ser controlada pelo usuário, fornecendo dessa maneira a quantidade de informação necessária em cada caso. Inclusive a opção para gerar gráficos de saída é determinada pelo usuário. Normalmente são gerados dois arquivos de saída, um deles "transtef.out", que contém o relatório de saída em modo texto e outro arquivo chamado "plots.out", contendo resultados numéricos para obter os gráficos de algumas grandezas.

Apêndice D

Cálculo de Índices de Estabilidade Transitória e Permanente Usando Redes Neurais

CALCULO DE INDICES DE ESTABILIDAD TRANSITORIA Y PERMANENTE MEDIANTE REDES NEURALES

V.L. Páucar ¹

lpauca@dsee.fee.unicamp.br

A.L. Morelato ²

morelato@dsee.fee.unicamp.br

Departamento de Sistemas de Energía Eléctrica - DSEE
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Campinas - SP - Brasil

Resumen

En este artículo son tratadas algunas aplicaciones de redes neurales artificiales en el cálculo de índices de estabilidad transitoria y permanente de sistemas eléctricos de potencia. Las redes neurales adoptadas son del tipo multiperceptrones dispuestos en capas, entrenadas con el algoritmo de retropropagación estándar. Existen diversos índices que permiten estimar la estabilidad transitoria electromecánica síncrona de los sistemas de potencia, uno de los más usados es el tiempo crítico de eliminación de una falla, el cual es calculado normalmente por integración numérica. Otro índice de estabilidad transitoria es el margen de estabilidad transitoria, que puede ser calculado a partir de la formulación de una función de energía transitoria. Luego de obtener un conjunto de patrones de entrenamiento, obtenidos a partir de la integración numérica de las ecuaciones diferenciales que definen la dinámica transitoria de un sistema de potencia, se procede al entrenamiento y posterior validación de la red neural, utilizando datos diferentes a los del entrenamiento. La estabilidad permanente de los sistemas de potencia usualmente se determina mediante el cálculo de los valores propios, las redes neurales pueden sintetizar ese cálculo indicando apenas si el sistema es estable o no, observando si ningún valor propio tiene parte real positiva o no, respectivamente. Se mencionan resultados y discusiones sobre la utilidad y alcances de las redes neurales en la determinación de los índices de estabilidad electromecánica abordados.

Palabras claves: Estabilidad transitoria, estabilidad permanente, redes neurales, inteligencia artificial, sistemas eléctricos de potencia.

¹Con licencia por estudios de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE), Lima, Perú, en donde es Profesor Asociado. E-mail: lpauca@fiec.uni.pe

²Actualmente es Profesor Titular en el DSEE/FEEC/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil

1. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia suelen experimentar continuamente fenómenos dinámicos que la operación en régimen permanente en la práctica es ideal. Eventos de naturaleza aleatoria ocurren a cada instante, tales como la simple conexión y desconexión de cargas, que normalmente no causan perturbaciones al sistema, a no ser que se encuentre operando en regiones límites de su estabilidad permanente, en cuyo caso oscilaciones electromecánicas pueden llevar al sistema a perder su estabilidad a perturbación pequeña. Si se presenta una perturbación de gran magnitud y de forma súbita, el sistema de potencia se ve sometido a una serie de oscilaciones electromecánicas de gran magnitud que comprometen, en muchos casos, el sincronismo del sistema, ejemplos de perturbaciones grandes son las fallas monofásicas a tierra.

Si bajo la presencia de perturbaciones pequeñas el sistema de potencia es susceptible de experimentar una potencial inestabilidad, ciertas medidas preventivas debieran ser adoptadas. Estudios de la dinámica del sistema, envolviendo el cálculo de valores y vectores propios, posibilita estimar la estabilidad del sistema. Esos cálculos se acostumbra realizarlos off-line y en etapas de planeamiento, dado que el procesamiento on-line puede significar tiempos de cálculo prohibitivos para ese propósito.

Si ocurre una perturbación grande como una falla en una línea de transmisión, el sistema de potencia posee un sistema de protección que en definitiva puede despejar o eliminar la falla, desconectando por ejemplo la línea de transmisión. Es de vital importancia que el tiempo en que operen esas protecciones sean mínimos a fin de que el sistema tenga tiempo de recuperarse de esa "perturbación" en sus niveles energéticos, porque de no suceder ello la inestabilidad sería inminente. Aquí también un procesamiento on-line puede ser oneroso en tiempos computacionales. Estudios de estabilidad transitoria son realizados off-line, intentando precaverse a fin de disponer de medidas que eviten la inestabilidad transitoria del sistema. Estos estudios intentan determinar indicadores que permitan cuantificar o cualificar la estabilidad del sistema ante perturbaciones grandes. En los casos anteriores es evidente la necesidad de preservar la operación segura del sistema de potencia, con la intención de garantizar el normal suministro de energía eléctrica y atendiendo todo el tiempo la demanda de carga del sistema.

Los desarrollos alcanzados en el campo de las redes neuronales artificiales, o simplemente redes neurales (RN), están permitiendo que las RN sean aplicadas ampliamente en los sistemas eléctricos y en la industria eléctrica en general. En este trabajo se pretende mostrar una de las herramientas más usadas de las redes neuronales, las redes de multiperceptrones, en la aplicación para calcular o sintetizar algunos de los índices de estabilidad transitoria y permanente que probaron su utilidad en sistemas eléctricos de potencia reales. El entendimiento correcto de la problemática de la estabilidad síncrona puede proveer un mejor aprovechamiento del potencial de las RN. Pese a lo promisorio de los resultados que se mencionan en la literatura, poco se trata de los alcances y limitaciones de las redes neuronales cuando se aplican a los sistemas de potencia; una discusión al respecto permitirá ahondar más en esas reflexiones. Finalmente debe mencionarse que para entrenar las redes neuronales en este trabajo se usó el conocido algoritmo de retropropagación, por ser el más difundido de los métodos de entrenamiento supervisado.

2. Indices de Estabilidad Transitoria

La estabilidad transitoria del sistema eléctrico de potencia constituye la capacidad de permanecer en sincronismo luego de la ocurrencia de una gran perturbación, para esa perturbación. Eso indica que un sistema de potencia será estable (o inestable) transitoriamente para una tal perturbación. Los rangos de tiempo envueltos en esta problemática son cortos, apenas algunos segundos. Si la modelación de las máquinas síncronas es el modelo clásico, un estudio de estabilidad transitoria puede significar apenas el estudio de la primera oscilación.

Existen diversos métodos de cálculo de la estabilidad transitoria que pueden ser agrupados en: indirectos, directos y reconocimiento de patrones. Entre los indirectos se usa ampliamente el de simulación numérica. De los directos son más conocidos el de Lyapunov y el de la Función de Energía Transitoria TEF (por *Transient Energy Function*). En cualquiera de ellos el criterio puede ser calcular un índice de estabilidad, como por ejemplo el tiempo crítico de eliminación de la falta (tcr), o sino determinar un margen de energía transitoria (MET). Existen otros índices más pero no serán tratados aquí.

El problema de la estabilidad transitoria puede ser modelada utilizando el criterio de la segunda ley de Newton, y se expresa por el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales [ANDE77]:

$$\left. \begin{aligned} M_i \dot{\omega}_i &= Pm_i - Pe_i - D_i \omega_i \\ \dot{\delta}_i &= \omega_i, \quad i = 1..n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

En donde para la máquina i :

- δ_i = ángulo del rotor
- ω_i = velocidad del rotor
- M_i = constante de inercia del generador
- D_i = coeficiente de amortiguamiento, suele despreciarse
- Pm_i = entrada de potencia mecánica
- Pe_i = potencia eléctrica
- Pa_i = $Pm_i - Pe_i$ = potencia acelerante

La potencia eléctrica de la i -ésima máquina es definida como

$$Pe_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] + E_i^2 G_{ii} \quad (2)$$

siendo

$$\left. \begin{aligned} C_{ij} &= E_i E_j B_{ij} \\ D_{ij} &= E_i E_j G_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

donde

- E_i, E_j = magnitudes de las tensiones internas de las máquinas i e j
 G_{ii} = parte real del elemento ii de la matriz admitancia Y reducida
 G_{ij}, B_{ij} = partes real e imaginaria del elemento ij de la matriz Y reducida

2.1 Cálculo del Tiempo Crítico de Eliminación de Falta

Frente a la ocurrencia de una perturbación, si la falta es despejada por el sistema de protección, en un tiempo inferior o igual a t_{cr} , entonces el sistema será estable, de no ser así el sistema será inestable para esa perturbación. Normalmente el t_{cr} se calcula iterativamente, y en varios casos por prueba y error.

Aquí vamos a suponer que se quiere calcular un t_{cr} indirectamente de la observación de las curvas $\delta \times t$. Los ángulos δ se obtienen por integración numérica de las ecuaciones 1, se utilizó el método trapezoidal implícito. Se va a considerar como sistema de prueba la versión modificada del sistema de 9 barras y 3 generadores conocido como sistema WSCC (Western System Coordinating Council), originalmente citado en la referencia [FOUA77]. El nuevo sistema [FOUA81a, FOUA81b] contiene un total de 11 barras y 4 generadores, con una capacidad de 680 MW.

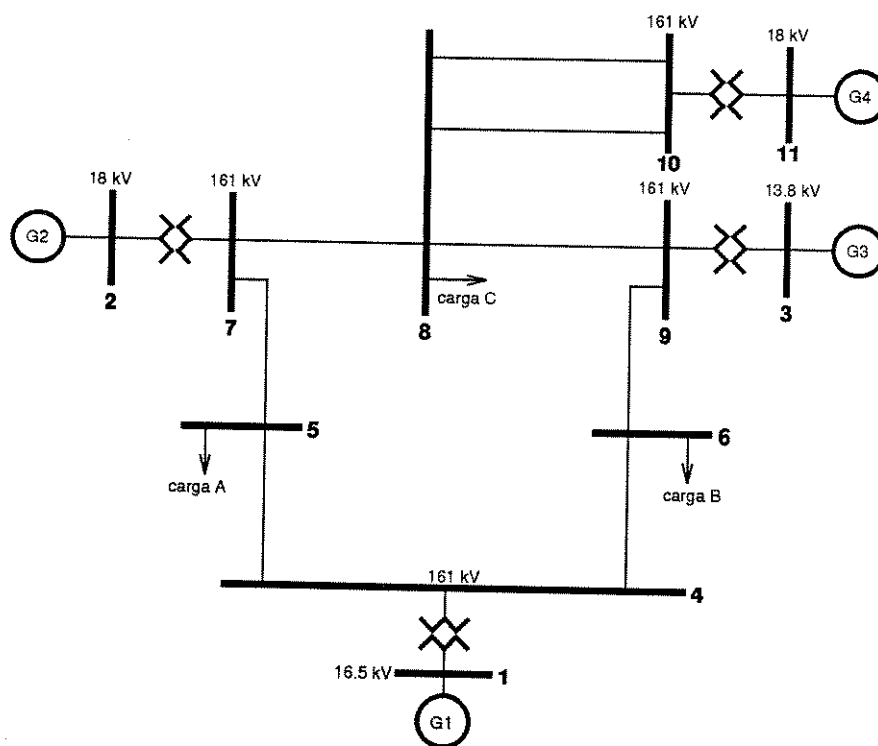


Figura 1. Sistema eléctrico de prueba WSCC de 11 barras y 4 generadores.

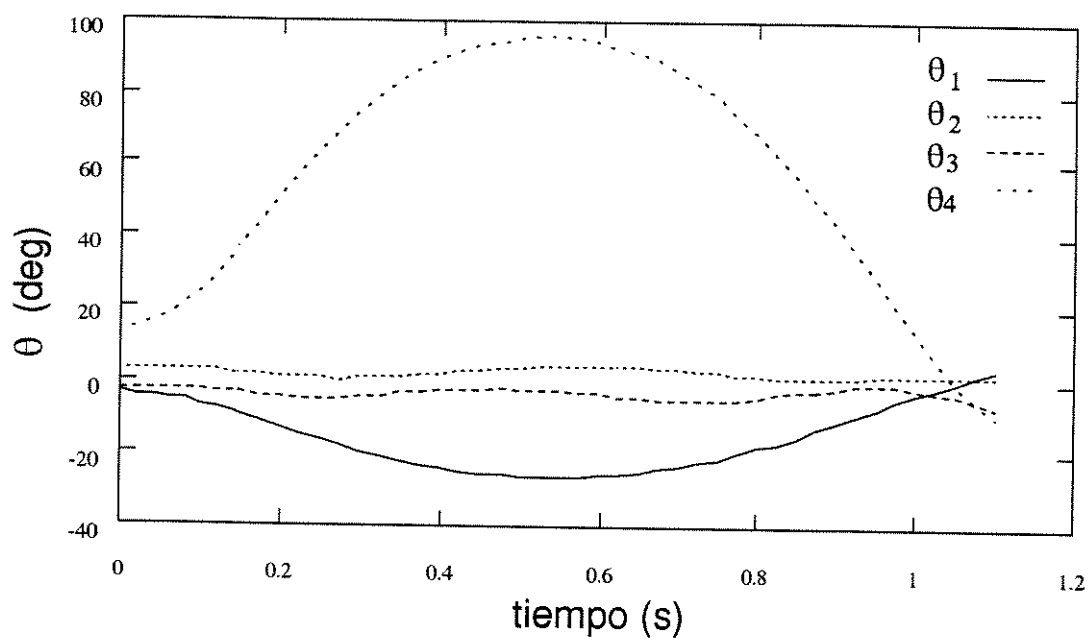


Figura 2. Sistema WSCC: falla trifásica en la barra 10, eliminada en $t=0.148s$, caso base 100% de carga (sistema estable).

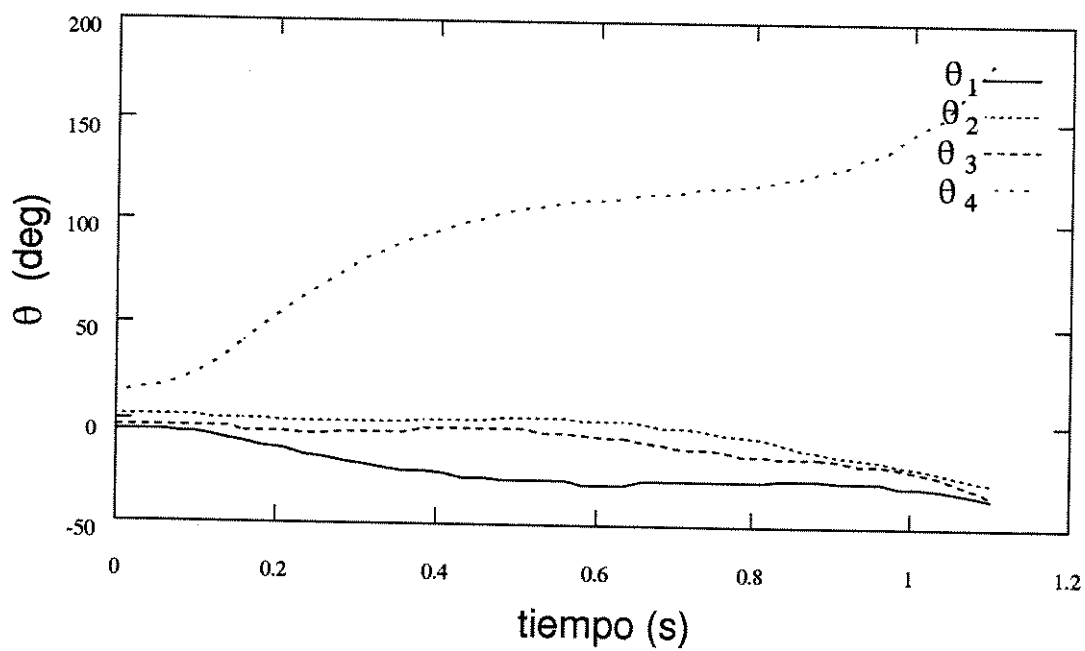


Figura 3. Sistema WSCC: falla trifásica en la barra 10, eliminada en $t=0.159s$, 100% de carga (sistema inestable)

El cálculo de t_{cr} usando el método de integración numérica, presenta el inconveniente de los tiempos de cálculo empleados en la simulación que posibilita hallar los valores de δ_i en el tiempo, 5 segundos es un tiempo total de simulación elevado, suele preferirse valores de 1 segundo de simulación y con un paso de integración numérica de 0.02 s.

Para determinar el tiempo crítico t_{cr} puede procederse iterativamente disminuyendo el intervalo entre los tiempos de despeje de falta para un caso de estabilidad y otro de inestabilidad, y así hasta tener el valor deseado. En el caso del ejemplo, el tiempo t_{cr} está comprendido entre 0.148 y 0.159 s, al cabo de algunas tentativas, puede estimarse que $t_{cr} = 0.156$ s. En las figuras se nota el uso de los ángulos θ_i , los cuales corresponden a los ángulos δ_i cuando la referencia es el centro de inercia (COI) o centro de ángulos, es decir, $\theta_i = \delta_i - \delta_{COI}$. Luego se verá que para generar los puntos de entrenamiento para las redes neurales será preciso calcular varios t_{cr} correspondientes a distintas condiciones de operación.

Si bien este cálculo de t_{cr} es sencillo, no es práctico para sistemas grandes por todo el trabajo que requeriría. En aplicaciones on-line, el cálculo de t_{cr} según el criterio indicado sería inadecuado. La indicación que t_{cr} entrega sobre el sistema de potencia, es un "tiempo límite", separando los tiempos de despeje estables (inferiores a t_{cr}) y los tiempos de despeje inestables (superiores a t_{cr}).

Varias alternativas fueron pensadas para el cálculo de t_{cr} , una de ellas se basa en la función de Lyapunov [PAI 83]. Esta metodología compara el valor de la función de Lyapunov en el instante de despeje de la falta, con un valor crítico calculado inicialmente. A pesar de los progresos realizados, esta metodología aún adolece de ciertas dificultades como : simplificaciones de las conductancias de transferencia; tiene que simularse numéricamente el sistema durante el período de falla; si el punto de operación cae fuera de la región de estabilidad previamente supuesta, nada se puede estimar sobre la estabilidad o inestabilidad del sistema.

El uso de redes neurales para sintetizar el tiempo de despeje crítico, puede ser una solución para el exitoso y práctico cálculo de este índice de estabilidad transitoria.

2.2 Cálculo del Margen de Energía Transitoria

Cualquier método que pueda predecir la estabilidad transitoria del sistema en tiempos de procesamiento menores que el de simulación numérica ya es interesante, uno de ellos es la función de energía transitoria [ATHA79]. Se le considera dentro de la familia de los métodos tipo energía y guarda semejanzas con el método de igualdad de áreas. En las figuras 4 y 5, se tiene que A_1 y A_2 son las energías acelerante y desacelerante. Si la acelerante resulta mayor, el sistema será inestable, caso contrario el sistema será estable. Los puntos de equilibrio estable e inestable vienen a ser SEP (por *stable equilibrium point*) y UEP (por *unstable equilibrium point*). El margen de energía transitoria (MET) se define como la energía en el punto de equilibrio inestable menos la energía en el instante de despeje de la falta. Si el MET es positivo significa que el sistema es estable, en caso contrario será inestable.

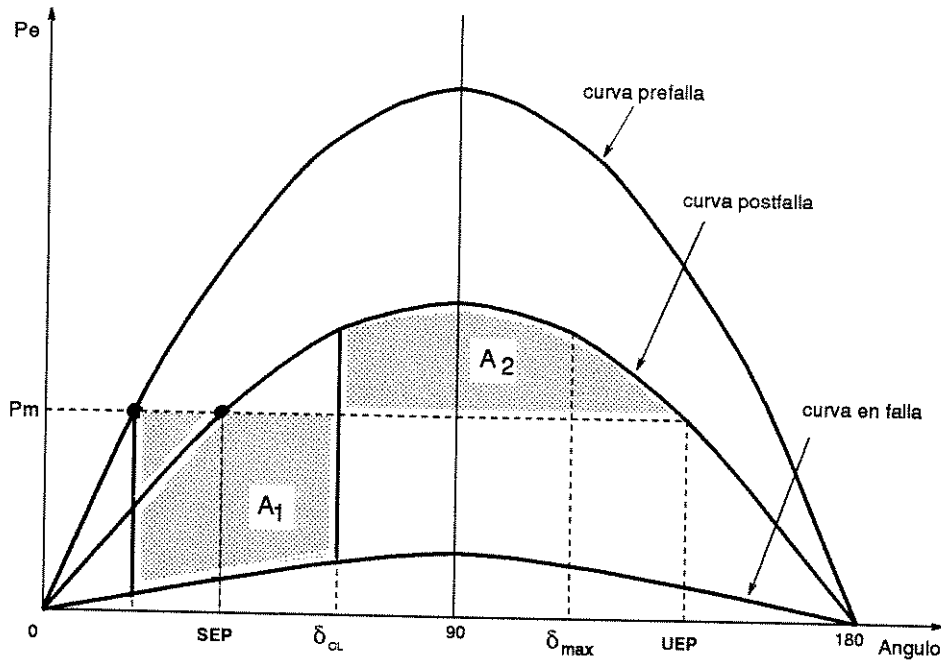


Figura 4. Criterio de igualdad de áreas para el sistema máquina x barra infinita.

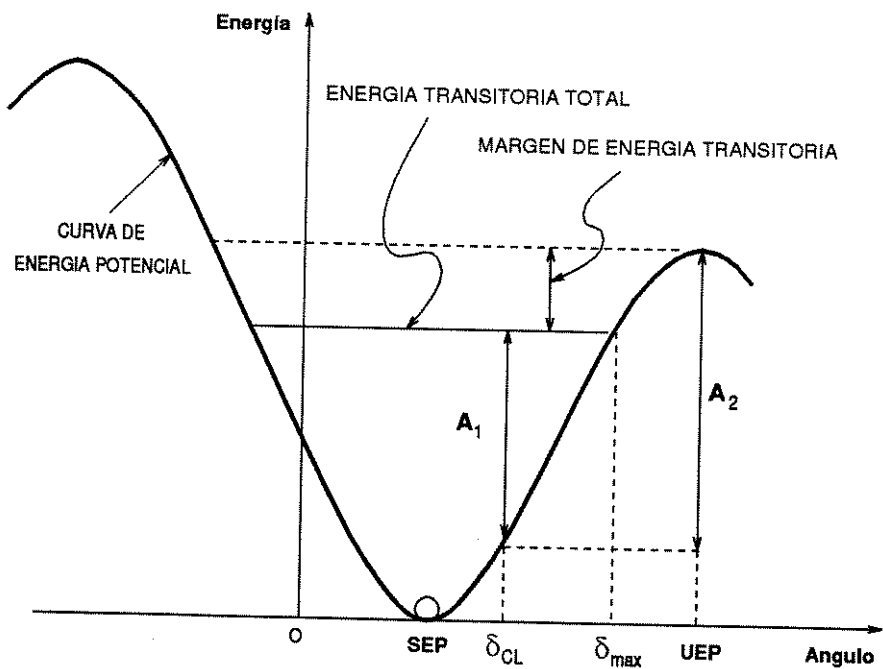


Figura 5. El método TEF para el sistema máquina x barra infinita.

Un aspecto interesante en este método es que siempre se tiene un valor de MET, sea positivo o negativo, eso permite estimar cuan estable o inestable es el sistema para una perturbación dada. Inclusive si el sistema es de varias máquinas síncronas el MET continúa siendo un escalar, aunque la curva de energía potencial se transforma en un superficie de energía potencial. La energía evaluada en el punto UEP es energía potencial y se llama energía crítica V_{cr} , mientras que la energía en el instante de despeje de la falta es V_{cl} . El margen de energía transitoria MET ó ΔV se define como

$$\Delta V = V_{cr} - V_{cl} \quad (4)$$

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i(\theta_i - \theta_i^s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[E_i E_j B_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) - \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} E_i E_j G_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (5)$$

Una dificultad en evaluar el MET es el cálculo de los puntos de equilibrio, que puede significar tiempos de CPU prohibitivos [CHIA94]. Para sistemas a gran escala se usa un método basado en la dispersidad. A partir del MET es posible derivar sensibilidades y con eso se puede estimar la seguridad dinámica de un sistema de potencia.

3. Cálculo de la Estabilidad Permanente

La estabilidad permanente de un sistema eléctrico de potencia se expresa como el límite del sistema de permanecer en sincronismo ante cualquier perturbación de pequeña magnitud. En ese caso la dinámica del sistema de potencia se representa en forma linealizada en torno de un punto de operación, mediante la ecuación de estado del sistema:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$y = Cx \quad (7)$$

Una forma de estimar la estabilidad permanente es calcular los valores propios del sistema anterior. Si todos los valores propios tienen parte real negativa el sistema será estable, y si por lo menos uno de ellos tiene parte real positiva, el sistema será inestable para perturbaciones pequeñas y para el punto de operación presente. Una manera de mejorar la estabilidad permanente es mediante el estabilizador de potencia (PSS por *power system stabilizer*), que se adiciona a la máquina síncrona tal como se muestra en la figura 6, que describe el modelo incremental de Heffron-Philips de la máquina síncrona [CHEN91]. El cálculo de los valores propios para sistemas grandes también conlleva un apreciable costo computacional de procesamiento, y si se desea una aplicación on-line tendrían que calcularse los valores propios para cada punto de operación. Además de este método, otros usan simulación numérica tal como con la estabilidad transitoria.

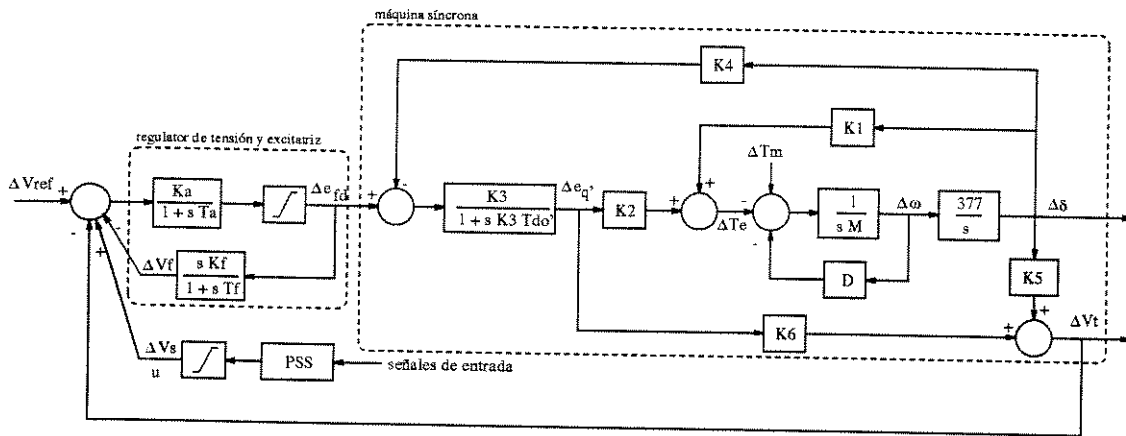


Figura 6. Modelo incremental de la máquina síncrona, incluye regulador de tensión y estabilizador de potencia.

En la literatura se disponen de métodos que calculan todos los valores propios o apenas los dominantes, esto será necesario para generar patrones de entrenamiento. Además de ello, la solución de la ecuación de estado puede considerar el estabilizador e inclusive su diseño. Para ello los vectores propios y un análisis de respuesta de frecuencia pueden ser útiles.

4. Indices de Estabilidad Transitoria y Permanente usando Redes Neuronales

La aplicación de las redes neuronales artificiales en los sistemas eléctricos de potencia es relativamente reciente, probablemente menos de diez años. No obstante, la cantidad de aplicaciones ya es amplia. De todas las aplicaciones que están mencionadas en la literatura [ELSH96], más del 80% de ellas usan redes neuronales artificiales de multiperceptrones estructurados en capas, siendo el algoritmo de entrenamiento preferido el de retropropagación (BP por *backpropagation*), pese a la advertencia que se plantea sobre el uso de esta técnica para entrenamiento on-line. El entrenamiento supervisado viene a ser el principio más utilizado de entrenamiento, razón por la cual se hará una revisión juntamente con el algoritmo BP.

Entrenamiento supervisado

La idea es tener un supervisor o patrón que permita una comparación con los valores calculados por la red neural. Se explica mediante el diagrama mostrado en la figura siguiente, es decir, una misma señal de entrada x_k es alimentada a un bloque simbolizando el proceso (el cálculo del índice de estabilidad en este caso) produciendo la salida deseada y_k^d , y también la señal es ingresada a la red neural, la cual produce una salida y_k . El error o diferencia entre y_k^d y y_k es reingresada a la red neural para realizar una corrección en base al error.

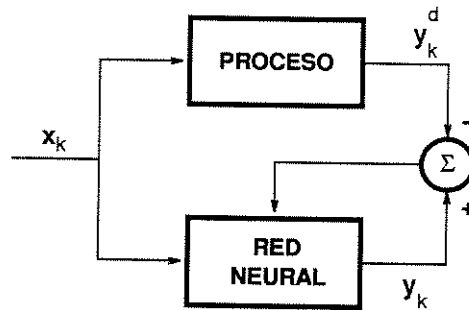


Figura 7. Entrenamiento supervisado de una red neural.

El algoritmo del entrenamiento supervisado, del cual el de retropropagación es el más conocido, es prácticamente un problema de optimización en el cual se pretende minimizar una función de error tipo $E_k(w) = \frac{1}{2} [y_k(w) - y_k^d]^2$, y contiene los siguientes pasos:

1. Escoger un vector de pesos inicial w_1 , hacer $k = 1$
2. Determinar una dirección de ajuste p_k y una tasa de ajuste α_k de manera que :
 $E(w_k + \alpha_k p_k) < E(w_k)$
3. Atualizar el vector de pesos, $w_{k+1} = w_k + \alpha_k p_k$
4. Si $\frac{\partial E(w_k)}{\partial w} \neq 0$, hacer $k = k + 1$ e ir al paso 2, sino $w_{(k+1)}$ es el mínimo deseado.

Revisión del Algoritmo de Retropropagación

Propuesto por Werbos (1974) y posteriormente por otros [RUME86], es una técnica del gradiente descendente para minimizar algún criterio de error E . [$p_k = -\nabla E(w)$, $\alpha_k = \text{constante}$]. Usa información de primer orden. Se basa en la regla delta (mínimos cuadrados). En el modo de actualización de pesos por lotes, el gradiente total ∇E para todo el conjunto de entrenamiento, es utilizado en la actualización de los pesos [HAYK94]:

Algoritmo de Retropropagación:

$$\min_w E(w) \quad w \in \mathbb{R}^n$$

$$w = w_0, \quad \eta > 0$$

Mientras $\|\nabla E\| \neq 0$, repetir

$$w_{k+1} = w_k - \eta \frac{\partial E}{\partial w} + \alpha \Delta w_{k-1} \quad (8)$$

η = tasa de aprendizaje, α = momentum.

Algoritmo del Gradiente

$$\min_w E(w) \quad w \in \mathbb{R}^n$$

$w = w_0, \quad \eta > 0$

Mientras $\|\nabla E\| \neq 0$, actualizar los pesos según

$$w_{k+1} = w_k - \eta \nabla E_k \quad (9)$$

Algoritmo de Newton

$$\min_w E(w) \quad w \in \mathbb{R}^n$$

$w = w_0$

Mientras $\|\nabla E\| \neq 0$, actualizar los pesos según

$$w_{k+1} = w_k - H_k^{-1} \nabla E_k \quad (10)$$

Algoritmo del Gradiente Conjugado

$$\min_w E(w) \quad w \in \mathbb{R}^n$$

$w = w_0$

Mientras $\|\nabla E\| \neq 0$, actualizar los pesos según

$$w_{k+1} = w_k - \frac{p_k^T \nabla E_k p_k}{p_k^T Q p_k} p_k \quad (11)$$

$$p_{k+1} = -\nabla E_{k+1} + \beta_k p_k \quad (12)$$

$$\beta_k = \frac{\nabla E_{k+1}^T Q w_k}{p_k^T Q p_k} \quad (13)$$

Algoritmo "BFGS"

$$\min_w E(w) \quad w \in \mathbb{R}^n$$

$w = w_0$

Mientras $\|\nabla E\| \neq 0$, actualizar los pesos según

$$w_{k+1} = w_k - \alpha_k D_k^{-1} \nabla E(w_k) \quad (14)$$

$$D_{k+1} = D_k + \frac{\eta_k \eta_k^T}{\delta_k^T \eta_k} - \frac{D_k \delta_k \delta_k^T D_k}{\delta_k^T D_k \delta_k} \quad (15)$$

$$\delta_k = w_{k+1} - w_k \quad (16)$$

$$\eta_k = \nabla E(w_{k+1}) - \nabla E(w_k) \quad (17)$$

Una red neural artificial de multiperceptrones en camadas (MLP por *multilayer perceptron*) constituye un modelo conexionista de inteligencia artificial, que tiene la capacidad de aprender

ciertas habilidades luego de un adecuado entrenamiento. En este caso el aprendizaje no es simplemente repetitivo sino también de generalización y especialización. La memoria de una red neural MLP se encuentra implícita en los valores de sus pesos sinápticos y en su estructura particular. El proceso de entrenamiento no es sino el cálculo de los pesos sinápticos óptimos. Luego del entrenamiento viene la fase de aplicación de la red neural, en ese caso dado un vector de entrada la salida es obtenida mediante un simple proceso *forward* envolviendo unas dos o tres multiplicaciones matriciales.

El entrenamiento es un problema de minimización de un error, y puede ser resuelto por cualquiera de los métodos citados. El BP es uno de los más robustos aunque requiere de muchas épocas para obtener convergencia, el método de Newton puede converger en pocos pasos, a veces dos, pero requiere mucha memoria y a veces falla por problemas de singularidad en la hessiana. Alternativamente el gradiente conjugado y el BFGS muestran mejor convergencia que el BP. Una opción sería usar el BP al comienzo y luego cambiar para el gradiente conjugado escalado o para el BFGS que son muy rápidos luego del inicio del entrenamiento. Si bien en la literatura se ha mencionado que el gradiente escalado es más de mil veces más rápido que el BP, nosotros encontramos que junto con el BFGS llegan a ser algunas decenas de veces más rápidos en las etapas avanzadas del entrenamiento, en las etapas de "refinamiento".

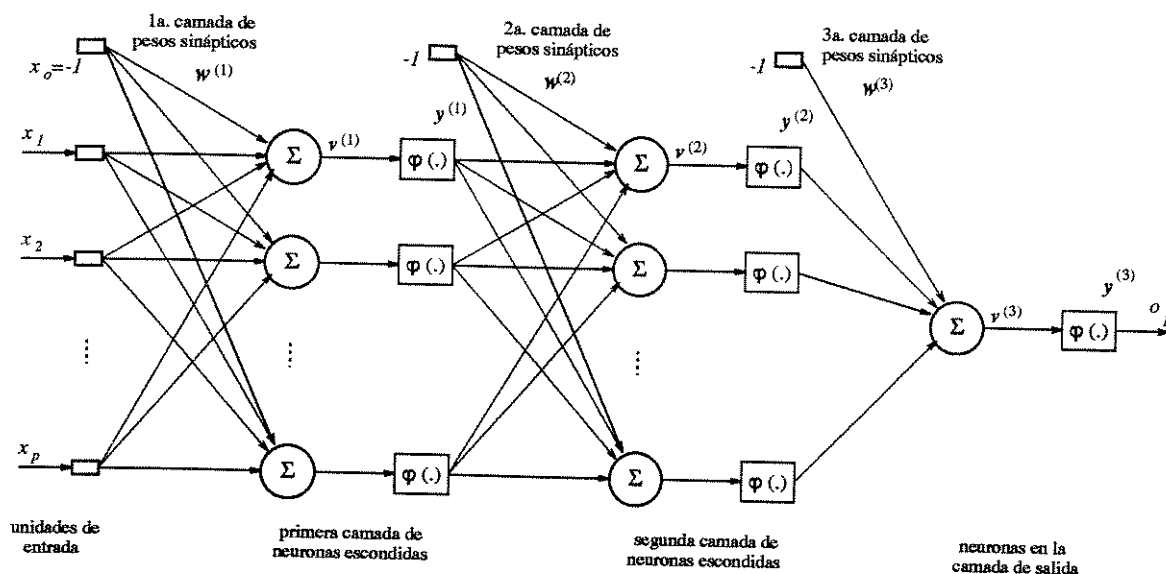


Figura 8. Arquitectura general de la red neural multiperceptrón utilizada en las aplicaciones.

Para el cálculo de los índices de estabilidad se han realizado programas computacionales en lenguaje C, previamente los algoritmos fueron probados mediante programas prototipos codificados en ambiente Matlab. la diferencia de los tiempos de procesamiento resultó ser varias decenas de veces a favor del C.

Para calcular el tiempo crítico de eliminación de falta de la estabilidad transitoria se experimentaron diversas redes neurales de perceptrones, y con una o más capas escondidas. Los unidades de entrada también fueron diversas. Una de las combinaciones fue la utilizada en la referencia [SOBA89], es decir, los ángulos iniciales de los rotores, las potencias acelerantes ponderadas por el inverso de la inercia, y las energías acelerantes. Otra opción estudiada fue utilizar más variables de entrada tales como: a) ángulos iniciales de los rotores, b) potencias acelerantes, c) energías cinéticas individuales, d) derivadas de las energías potenciales individuales, e) energía cinética total, f) tensión interna inicial. Solo consideramos fallas trifásicas en una de las barras del sistema en estudio.

Cuando se usan más cantidades de operación en las unidades de entrada, la unidad de salida o_1 que sintetiza el tiempo crítico, presenta un ligero mejor comportamiento que cuando se suministra menos información. Entrenamientos considerando solo las energías cinéticas también dieron resultados aceptables.

Una red neural conteniendo una sola camada de neuronas escondidas con unas 5 a 10 neuronas, por ejemplo, es capaz de sintetizar los tiempos críticos con una convergencia de 0.001 como criterio mínimo del error cuadrático medio total. Lo interesante fue que para valores menores de convergencia, la red neural puede presentar un sobre-entrenamiento quedando muy especializada en algunos puntos de entrenamiento, y por otro lado cuando el criterio de convergencia fue muy alto, la red neural no quedó satisfactoriamente entrenada, aprendió poco.

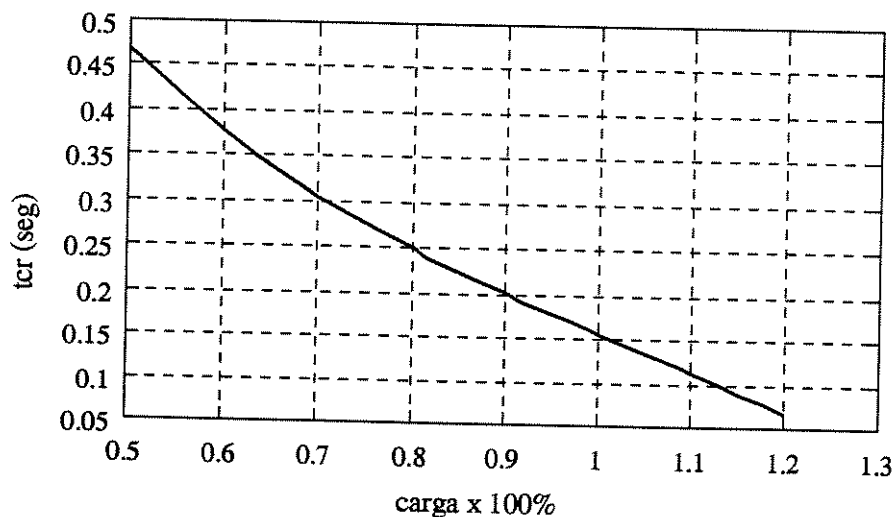


Figura 9. Curva de tiempos críticos y nivel de carga del sistema WSCC, falla trifásica en la barra 10 despejada retirando una línea 8-10.

El entrenamiento de una red neural para calcular los t_{cr} en cierta forma guarda similitud con entrenar una red neural para mapear una función, tal como sucedería con la curva mostrada en la figura 9. Hasta cierto punto existe relación entre ajustar una curva (por mínimos cuadrados por

ejemplo) con **entrenar** una red para una dada topología. Si fueran varias topologías diferentes, se tendría una **familia** de curvas, con sendas topologías por cada condición de operación.

Una forma **sencilla** de entrenar la red neural fue usar en la entrada solo la energía cinética total y el nivel de carga del sistema, dos neuronas en cada una de dos camadas escondidas permitieron un **entrenamiento** satisfactorio. Se utilizaron 15 conjuntos de entrenamiento y 8 conjuntos para **prueba** de la red neural entrenada, factor de aprendizaje $\eta = 0.1$, momentum $\alpha = 0.005$, **entrenamiento** con actualización de los pesos sinápticos en el modo por lotes y con los datos de **entrada** ingresados en forma aleatoria (*scramble*).

Para un criterio de convergencia $\epsilon = 0.0002$ se realizaron cincuenta entrenamientos con sus respectivas **pruebas**, el tiempo total de procesamiento fue de 315 segundos, el número promedio de épocas 4802, el **promedio** de todos los 50 mayores errores de prueba (apenas error y no error cuadrático medio) en el cálculo de los t_{cr} para el conjunto de los puntos de prueba fue de 0.0085 segundos, el **mayor** error de todas las 50 pruebas fue 0.0157 segundos, el menor error de las 50 pruebas fue 0.0054 segundos. En resumen, un promedio de 3.11 % en los errores máximos al aplicar la red **neural** de cada entrenamiento a todo el conjunto de puntos de prueba. Esto puede entenderse del **siguiente** modo, después del entrenamiento se espera que la red neural calcule los t_{cr} con un error **máximo** de 3.11 % en cada punto de operación del sistema, siendo ese punto de operación **diferente** o similar a los del entrenamiento. Por otro lado, unas 5000 épocas de entrenamiento **llevar**an unos 6.5 segundos.

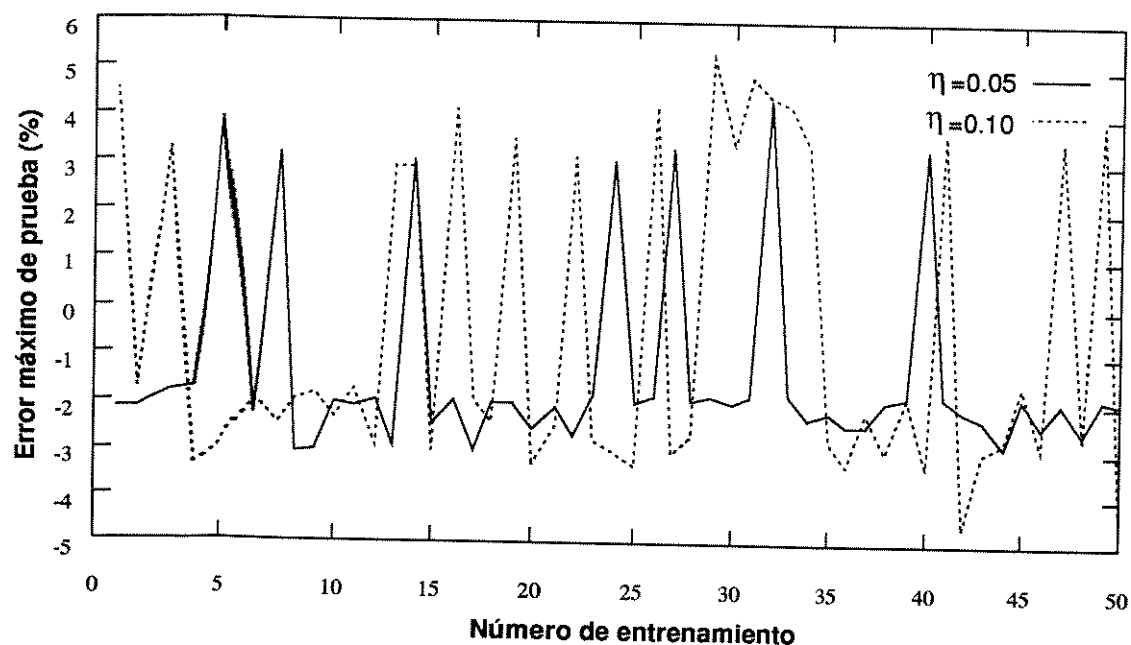


Figura 10. Error máximo de prueba en % vs No. de entrenamiento, para calcular t_{cr} , falla trifásica en la barra 10 despejada retirando la única línea 8-10 (topología 2).

Esos resultados fueron obtenidos en una SUN Sparc 10. Cuando el factor de aprendizaje fue disminuído a la mitad, el tiempo total de procesamiento para 50 entrenamientos fue de 648 segundos con un promedio de 9612 épocas por entrenamiento, interesante fue notar que el promedio del mayor error cayó de 3.11% para 2.38 %, siendo 0.0074 s el promedio del máximo error usando el conjunto de datos de prueba.

Si se consideran topologías diferentes para un conjunto de condiciones de operación diferentes, la red neural no presenta la misma calidad de aprendizaje que con una sola topología, este detalle se observó al aplicar la red neural a un conjunto de datos para una topología y condición de operación diferente de alguna de las utilizadas en el entrenamiento. Si se relaja la convergencia se compromete la precisión de todo el aprendizaje. A pesar de algunos resultados alentadores publicados recientemente, aún no fue posible conseguir resultados definitivos. En algunas situaciones la red neural consigue obtener un aprendizaje adecuado, pero en muchas otras el entrenamiento resulta inapropiado para nuevas topologías.

Los tiempos críticos t_{cr} son factibles de sintetizar ya sea usando una camada escondida o dos camadas, en el primero la precisión puede no ser excelente, en el segundo caso no es aconsejable un excesivo número de neuronas para la segunda camada escondida. La sintonización de los parámetros del entrenamiento no es un caso crítico, con tal de evitar el efecto de super-especialización y el de sub-aprendizaje. Con factores de aprendizaje elevados el entrenamiento a veces no converge, y con factores demasiado pequeños, el BP puede quedar preso en mínimos locales, ahí el momentum es útil.

Para determinar el margen de energía transitoria se investigaron diversas posibilidades de datos de entrada a la red neural. Por ejemplo, $x_1, x_2, \dots, x_p$ conteniendo los ángulos θ_i de prefalla, Pa_i de prefalla, puntos de equilibrio estables SEP, puntos de equilibrio inestables UEP, energías cinéticas, derivadas de las energías potenciales individuales en el momento de despeje de la falta, nivel de carga del sistema, módulos de las tensiones internas de generación. Considerando tanto las energías cinéticas en el instante de eliminación de la falta, juntamente con el nivel de carga, se llegó a entrenamientos con aprendizajes aceptables y con tiempos de procesamiento razonables del orden de decenas de segundos. Para un cálculo más exitoso del MET vía redes neurales se hace necesario usar en el entrenamiento, abundante información sobre las condiciones del sistema en pre-falla e inmediatamente después del despeje de la falla. Nosotros formulamos todos estos datos en relación al centro de inercia del sistema de potencia.

Algunos autores en la literatura han utilizado el margen de energía transitoria para calcular los tiempos críticos de eliminación de la falta, podría hasta pensarse que sería mejor lo contrario, determinar los MET a partir de los t_{cr} , el MET da más información sobre la estabilidad transitoria del sistema y de las máquinas síncronas envueltas en los fenómenos electromecánicos dada una gran perturbación, mientras que los t_{cr} solo indican "discretamente" la estabilidad o inestabilidad. En todo caso, la literatura sobre el tema indica que hubo mucho más investigación intentando calcular los t_{cr} que los márgenes de estabilidad transitoria. Seguir esa política, pero utilizando redes neurales, no pareciera ser lo más recomendado, pensamos que el cálculo del MET debiera ocupar más atención.

Sobre la aplicación de redes neurales para el cálculo de la estabilidad permanente del sistema de potencia puede establecerse que existen también caminos similares a los que se presentan en la estabilidad transitoria, por un lado el camino "discreto" y por otro el "continuo". Queremos decir que existe opción de entrenar una red neural para que pueda discernir si el sistema de potencia, dada una condición de operación, es estable o inestable. La otra opción engloba varias alternativas, una de ellas, tal vez la más simple, es intentar el cálculo del valor propio más dominante. Dentro del segundo grupo quedaría todavía más alternativas, como calcular un conjunto o conglomerado de valores propios dominantes. Ahí se puede utilizar la red neural con más de una salida de manera que en la salida se obtengan, por ejemplo, los cinco valores propios dominantes (en el supuesto de un sistema de más de cinco máquinas síncronas).

En un primer caso se utilizó el algoritmo BP para entrenar una red neural del tipo MLP, datos de entrenamiento fueron el nivel de carga, el valor propio dominante, el factor de potencia, la tensión interna de generación. La red neural consistió de dos camadas de perceptrones, con una media de cuatro por camada. El patrón de entrenamiento apenas la decisión de si el sistema es estable o no. Si se recurre a un algoritmo de entrenamiento tipo máquina de Nilsson los tiempos de procesamiento suelen ser menores.

Un aspecto importante en la aplicación de las redes neurales a sistemas eléctricos de potencia, es la generación de los vectores de entrada $\mathbf{x}$, con $x_i, i = 1..p$. Se requiere bastante trabajo para determinar los datos para el entrenamiento y la prueba de la red neural, y a veces ni eso es suficiente cuando de sistemas grandes se trata. Si el conjunto de datos de entrenamiento no fue realizado de forma precisa, el entrenamiento puede amplificar esos errores y llevar a una red entrenada para situaciones diferentes de las que se quisiera.

5. Conclusiones

- La estabilidad transitoria de los sistemas eléctricos de potencia puede ser medida utilizando índices como el tiempo crítico de eliminación de la falta y el margen de energía transitoria. Para situaciones en donde se requiere calcular esos índices para varias condiciones de operación y con diversas topologías, los tiempos de procesamiento pueden ser prohibitivos si es que se están usando técnicas convencionales como la simulación numérica de las ecuaciones diferenciales. Este aspecto puede ser crucial en aplicaciones *on-line*. Para el cálculo de la estabilidad permanente y después de formar la ecuación de estado, se procede a determinar los valores propios del sistema, los cuales indicarán si el sistema es estable o inestable, para la condición de operación correspondiente.
- Redes neurales artificiales de multiperceptrones estructuradas en capas, entrenadas con el algoritmo estándar de retropropagación son factibles de ser usadas con la finalidad de sintetizar índices de estabilidad transitoria y permanente, para diferentes condiciones de operación del sistema de potencia y en ciertos casos para configuraciones topológicas, todas diferentes de aquellas que sirvieron para el entrenamiento. Como entrada a las redes neurales puede usarse cualquier conjunto de cantidades de operación, que definan con claridad el índice que se desea calcule la red neural, y en una cantidad suficiente.
- Las redes neurales entrenadas convenientemente, pueden sintetizar los principales índices de estabilidad con errores relativamente bajos, errores máximos en torno del 5% son valores considerados satisfactorios.
- El entrenamiento de redes neurales utilizando entornos de desarrollo como el *Matlab*, *Mathematica*, etc., es más lento en comparación a entrenamientos que recurren a programas computacionales específicos codificados en lenguajes de programación convencionales, especialmente cuando la red neural es simulada con un número significativo de neuronas. Por otro lado, las facilidades de programación en alto nivel y las múltiples opciones gráficas que permiten esos “softwares”, los hace atractivos para simulaciones específicas con gran despliegue de figuras e información detallada de las variables involucradas.

Agradecimientos

El primer autor agradece el soporte del “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico” (CNPq), Brasil, así como el apoyo de la UNI-FIEE, Lima, Perú.

Referencias

- [ANDE77] Anderson P.M and Fouad A.A., "*Power System Control and Stability*", Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- [ATHA79] Athay T., Podmore R. and Virmani S., "A Practical Method for Direct Analysis of Transient Stability", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-98, pp.573-580, USA, 1979.
- [CHEN91] Chen C-R. and Hsu Y-Y., "Synchronous Machine Steady-State Stability Analysis Using an Artificial Neural Network", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.6, No.1, pp.12-19, USA, March 1991.
- [CHIA94] Chiang H.D., Wu F.F. and Varaiya P.P., "A BCU Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.9, No.3, pp.1194-1208, USA, 1994.
- [ELSH96] El-Sharkawi M. and Niebur D., "Artificial Neural Networks with Applications to Power Systems", *IEEE Power Engineering Society Tutorial Course*, 1996.
- [FOUA81a] Fouad A.A. and Stanton S.E., "Transient Stability of a Multi-Machine Power System. Part I: Investigation of System Trajectories", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No.7, pp.3408-3416, USA, July 1981.
- [FOUA81b] Fouad A.A. and Stanton S.E., "Transient Stability of a Multi-Machine Power System. Part II: Critical Transient Energy", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No.7, pp.3417-3424, USA, July 1981.
- [HAYK94] Haykin S., "*Neural Networks. A Comprehensive Foundation*", Macmillan Publishing Company, USA, 1994.
- [PAI 83] Pai M.A., "*Power System Stability. Analysis by Direct Method of Lyapunov*", North-Holland Publishing Company, 1983.
- [RUME86] Rumelhart D.E., Hinton G.E. and Williams R.J., "Learning Internal Representations by Error Propagation". In Rumelhart D.E. and McClelland J.L., (eds), *Parallel Distributed Processing*, pp.318-362, Cambridge, MA, MIT Press, USA, 1986.
- [SOBA89] Sobajic D.J. and Pao Y-H., "Artificial Neural-Net Based Dynamic Security Assessment for Electric Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.4, No.1, pp.220-228, USA, February 1989.

Procesamiento Paralelo y Distribuido para el Análisis de la Estabilidad Transitoria y Seguridad Dinámica en Sistemas Eléctricos de Potencia

Leonardo Paucar*
Member IEEE

André Morelato**
Member IEEE

UNICAMP, Campinas, Brasil

Resumen:

En este artículo se describen diversos conceptos y metodologías relacionadas con la aplicación de la informática y computación al análisis de la estabilidad transitoria y de la seguridad dinámica de los sistemas eléctricos de potencia. De igual modo se mencionan las técnicas de procesamiento paralelo y distribuido (PPD) utilizadas para realizar funciones específicas en los modernos centros de control de la energía eléctrica, que por el lado de la estabilidad transitoria on-line y la seguridad dinámica, son varios los desarrollos y estudios publicados en la literatura existente que demuestran la factibilidad de aplicarlos con éxito en la práctica.

Palabras clave: Procesamiento Paralelo y Distribuido, Estabilidad Transitoria, Seguridad Dinámica, Sistemas de Potencia.

1 Introducción

La industria de la energía eléctrica en el mundo se inicia a fines del siglo XIX, atendiendo escasos usuarios desde una pequeña central eléctrica mediante algunas líneas conductoras. Desde aquel entonces el número de usuarios y la magnitud de la demanda de energía creció en forma fantástica. Los complejos y enormes sistemas eléctricos que se crearon son denominados sistemas eléctricos de potencia, los cuales están constituidos por los centros de generación de la energía eléctrica o centrales eléctricas, las subestaciones de transformación, las líneas de transmisión en alta tensión, equipamientos adicionales tales como condensadores síncronos, condensadores estáticos y reactores, dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*), etc, y los centros de consumo de la energía, por ejemplo una área urbana.

Es posible distinguir que un sistema de potencia abarca toda la red eléctrica de alta tensión, a diferencia de un sistema de distribución que considera la red de media y baja tensión. Un esquema simplificado permite visualizar un sistema de potencia compuesto de tres partes: generación, transmisión y consumo.

La operación de todo sistema de potencia en general envuelve una determinada área geográfica relativamente grande, por ejemplo todo un estado, una región o un país. El adecuado funcionamiento de un sistema de potencia exige que el atendimento y suministro de la energía eléctrica sea ininterrumpido y dentro de estándares de calidad establecidos y regulados según el área de concesión. Por otro lado, a los productores de la energía eléctrica les es fundamental: respetar criterios técnicos para el normal funcionamiento del sistema así como para salvaguardar la vida útil de los equipos e instalaciones, y observar criterios económicos que significan generar y atender al menor costo posible, a ello tendría que agregarse otras restricciones tales como las ecológicas y hasta políticas.

Los sistemas de potencia actuales operan en forma interconectada y llegan a poseer centenas de unidades de generación, miles de barras - estas son las centrales de generación y estaciones transformadoras - y líneas de transmisión. La dimensión y complejidad de fenómenos que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia constituye un desafío para la ingeniería de potencia, especialmente cuando se trata de conseguir una adecuada y eficiente planificación, operación y control. Si bien la planificación de la generación y transmisión es una etapa que se realiza *off-line*, la operación y control en la mayoría de los casos requiere tomar medidas *on-line* e incluso en tiempo real. La ocurrencia, aleatoria o esporádica, de perturbaciones de pequeña y gran magnitud es inevitable para cualquier sistema eléctrico. Perturbaciones de gran magnitud, como son los cortocircuitos, originan que en intervalos de algunos minutos, el sistema de potencia tenga que ser monitoreado y analizado desde el punto de vista de su estabilidad transitoria y fundamentalmente de su seguridad, tanto estática como dinámica.

(*) Con licencia de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE), Lima, Perú, en donde es profesor asociado. [Emails: lpauca@dsee.fee.unicamp.br, lpauca@fiee.uni.pe]

(**) Profesor titular de la Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (DSEE). [Email: morelato@dsee.fee.unicamp.br]

Son los sistemas de gerenciamiento de los sistemas de potencia (EMS por *Energy Management System*) que realizan diversas funciones en línea entre las cuales debieran contarse la estabilidad transitoria y el análisis de la seguridad dinámica. El desarrollo y evolución de los centros de control iniciales hasta los actuales EMS, han estado íntimamente ligados con los avances de la informática y computación [47]. En cuanto se dispuso de los computadores digitales, los centros de control de la energía eléctrica comenzaron a equiparse computacionalmente y a incrementar funciones de operación y control cada vez más sofisticadas, respondiendo a las exigencias de la complejidad de acciones que requiere el adecuado funcionamiento de los sistemas de potencia.

Las metodologías y tecnologías de procesamiento paralelo y distribuido, y el más reciente procesamiento heterogéneo, también han estado relacionados con el surgimiento de los modernos sistemas de manejo de los sistemas de potencia. Funciones como la seguridad dinámica en línea, ahora parecen factibles de ser adicionadas, gracias a la evolución computacional e informática, así como a los desarrollos de herramientas de software en el área de análisis de la estabilidad transitoria y análisis de seguridad dinámica. La madurez alcanzada especialmente en estudios off-line de la estabilidad transitoria [10, 45], permite avizorar con éxito su implantación como función en línea en los EMS [52]. A ello habría que sumar el aporte, por ahora potencial, de las técnicas de inteligencia artificial. Los recientes avances de redes neuronales, lógica difusa, sistemas de agentes, sistemas expertos, entre otros, posiblemente faciliten y tornen eficientes algunas etapas de las funciones de los centros de gerenciamiento de sistemas de potencia. Sin los avances actuales y venideros de la computación de alto desempeño, HPC (*High Performance Computing*), sería difícil que a futuro los centros de gerenciamiento de la energía, cuenten con avanzadas funciones en línea y en tiempo real que serán de gran utilidad para preservar la seguridad de los sistemas eléctricos de potencia, y garantizar un servicio de calidad y sin interrupciones.

A continuación se mencionarán conceptos genéricos de procesamiento paralelo y distribuido, luego se describirán las características y funciones más comunes que realizan los centros de control y los modernos EMS. En seguida se mostrará en forma concisa, el panorama actual del análisis del problema de la estabilidad transitoria, convencionalmente y mediante procesamiento paralelo y distribuido. Después se mencionarán los principales avances conseguidos en el aspecto de seguridad dinámica en línea, desde la perspectiva de su aplicación como una de las principales funciones de los modernos centros de control de sistemas de potencia. Luego de las conclusiones, en las referencias se incluyen algunas fuentes recientes de la Internet.

2 Nociones de Procesamiento Paralelo y Distribuido

Del ENIAC al teracomputador

El ENIAC (Electric Numerical Integrator and Calculator) es considerado el primer computador digital, fue construido entre 1943 y 1946, costó más de medio millón de dólares, pesaba 30 toneladas, consumía 140 kW, en relación a su antecesor el MARK I era 1000 veces más rápido, un equipo de 200 personas se ocupaba de su funcionamiento que paró en 1956. Actualmente se define *supercomputador* como uno de los computadores más sofisticados, rápidos y poderosos en un determinado tiempo, según ello el ENIAC era un supercomputador en 1946.

Fueron cinco las generaciones de computadores electrónicos digitales desde 1945 hasta 1997, en la primera (1945-54) la tecnología consistía en usar válvulas y memorias de relés, un único CPU con aritmética de punto fijo, se usaba lenguaje de máquina/assembler no habían subrutinas. En la segunda generación (1955-64) aparecen los transistores, la aritmética de punto flotante, procesadores I/O, acceso de memoria multiplexado, lenguajes de alto nivel usados con compiladores, bibliotecas de subrutinas, de esta generación son ejemplos el IBM 7090, el CDC 1604 y el Univac LARC. Es en la tercera generación (1965-74) que hacen su ingreso los circuitos integrados, la microprogramación, segmentación (pipelining), memoria cache, procesadores, multiprogramación, sistemas operativos de tiempo compartido, aplicaciones multiusuario, a esa generación pertenecen el IBM 360/370, CDC 6000, PDP-8. Los conceptos de integración a gran escala y memoria a semiconductores aparecen en la cuarta generación (1975-90), y con ello surgen los multiprocesadores, supercomputadores vectoriales y multicomputadores, en software aparecen ambientes para procesamiento paralelo, ejemplos de computadores son el VAX 9000, CRAY X-MP, IBM 3090, etc. En la quinta generación (1991-1997) surgen los computadores masivamente paralelos con desempeños de algunos teraflops (1 teraflop = 10^{12} operaciones de punto flotante por segundo), entre los supercomputadores representativos de esta generación de la computación de alto desempeño se tienen el VPP550, CM-5, Paragon, NEC SX-4 A, HITACHI SR2201, IBM SP2, CRAY T3E-900, ASCI TFLOPS, etc. Lenguajes con facilidades de paralelización y vectorización como el ya anunciado Fortran 2000 dominarán los próximos años. [28, 30].

En lo referente a la velocidad de cálculo, cada cinco años se avanza en un orden de magnitud, para el año 2000 los supercomputadores llegarían a tener desempeños de más de una decena de teraflops, y el anunciado PC-98 con opción de algunos procesadores. En dos años sería

lanzado un nuevo chip, "Merced" (en desarrollo por la Intel y la Hewlett-Packard), con velocidad de reloj de 1000 MHz y un microprocesador de 64 bits.

En noviembre de 1996 la Cray Research lanza al mercado el supercomputador CRAY T3E-900, un sistema paralelo escalable que con un rendimiento de 1.8 teraflops llega a ser el primer sistema comercialmente disponible en alcanzar la cifra de los teraflops de desempeño. Las configuraciones de refrigeración de aire consideran elementos de procesamiento (PE) de 6 procesadores y las configuraciones de refrigeración líquida PE de hasta 32 procesadores. Cada procesador es capaz de 900 megaflops a 450 MHz para un rendimiento total del sistema de 5.4 gigaflops a 1.8 teraflops. El precio de lista de la serie CRAY T3E-900 comienza en medio millón de dólares. Los sistemas CRAY T3E-900 soportan paralelismo de memoria distribuida explícita a través de CF90 y C/C++ con intercambio de mensajes (MPI, MPI-2 y PVM) y modelos de programación de intercambio de datos, y paralelismo implícito mediante las características de trabajo compartido del HPF y del Cray CRAFT. La serie de supercomputadores CRAY T3E puede ir equipada hasta con 2048 procesadores. Las aplicaciones pueden ser desarrolladas en Fortran 90, C y C++.

Procesamiento Paralelo y Distribuido

Dentro de la computación de alto desempeño se enmarca el procesamiento paralelo concurrente del tipo multiprocesadores, el procesamiento vectorial del tipo segmentado (pipelining) y el procesamiento distribuido típico de los multicomputadores. Los computadores multiprocesadores serían análogos a un ejército de hormigas, formados por decenas a millares de procesadores como en el procesamiento masivamente paralelo (MPP por *Massive Parallel Processing*). Ya los multicomputadores lo serían a una manada de elefantes considerando usualmente entre 1 y 16 procesadores.

La diferencia entre procesamiento paralelo (PP) y procesamiento distribuido (PD) no es muy clara. En el PP el número de elementos de procesamiento es fijo, están distribuidos físicamente bien próximos y todos son idénticos. En el PD el número de elementos de procesamiento puede ser variable, pueden ser heterogéneos y físicamente no siempre están cerca. En lo referente a la comunicación en el PP los elementos de procesamiento se comunican con rapidez, los enlaces de comunicación son confiables y la comunicación es frecuente. En cambio en el PD la comunicación entre los elementos de procesamiento es más lenta y/o variable, no es tan confiable ni es tan frecuente. El rango de tareas que realiza el PP es más limitado que el PD que llega a ser casi de propósito general. Claramente se observa que el objetivo del PP es un mejor speed-up, en el PD además de speed-up, confiabilidad, compartir recursos y extendibilidad. [29].

El procesamiento paralelo consiste en la resolución de problemas mediante un conjunto de procesadores que se comunican entre sí y cooperan para resolver problemas. Comparado con el procesamiento en un solo procesador, el PP puede realizar cálculos con mayor rapidez (hasta saturarse) y en algunos casos permite abordar problemas prácticamente intratables [55]. En el uniprocésamiento el desempeño de un algoritmo no depende de la máquina, a diferencia del PP en el cual se necesita ajustar el algoritmo a la arquitectura.

Entre las características del multiprocésamiento se tienen: descomposición de las tareas, relaciones de dependencia entre las tareas, granularidad o grano "gr" que viene a ser el tamaño relativo de las tareas paralelas ($gr = t_{computación}/t_{comunicación}$), asignación de tareas a los procesadores, tipos de overhead (costos) y compatibilidad con arquitectura. Dos medidas de desempeño son utilizadas frecuentemente, el *speed-up* que se define como la razón entre el tiempo que gasta el mejor algoritmo secuencial en un procesador y el tiempo que gasta el algoritmo paralelo en NP procesadores, y la eficiencia (E) que es el speed-up dividido por NP. En lo referente al tamaño relativo de las tareas paralelas, si el valor del grano es grande se denomina grano grueso, en caso contrario será un proceso de grano fino; procesos de grano fino no son recomendables para PD.

Para los computadores seriales la arquitectura es SISD (*Single Instruction, Single Data*). En los computadores paralelos se distinguen dos tipos de arquitectura: SIMD (*Single Instruction, Multiple Data*) y MIMD (*Multiple Instruction, Multiple Data*). En la arquitectura SIMD una instrucción es realizada sobre varios datos en forma simultánea, la operación es sincrónica, una topología común es el Array Processor. La arquitectura MIMD considera múltiples instrucciones sobre múltiples datos y bajo una operación asíncrona, cada procesador puede realizar un programa diferente, la comunicación entre procesadores puede ser vía memoria global y memoria distribuida. En la figura 1 se presenta una taxonomía ampliada de los sistemas MIMD [51], en relación a la propuesta inicial de Flynn y cuyo artículo está reproducido en la referencia [33].

En los sistemas MIMD de memoria global, cada procesador lee y escribe datos en la única memoria global, por ello la cantidad de accesos a la memoria debe ser lo menos posible; son sistemas fáciles de programar y de comunicación rápida, si bien existen desventajas como la posibilidad de congestionamiento (*bus contention*) y falta de escalabilidad. En los sistemas MIMD de memoria distribuida, la comunicación entre procesadores es por intercambio de mensajes (*message passing*), son sistemas escalables, en contrapartida son difíciles de programar, tienen mayor costo relativo y puede ocurrir congestionamiento cuando varios nodos envían mensajes al mismo tiempo para un mismo nodo, el tiempo de la-

tencia puede ser alto, en consecuencia el número de intercambios de mensajes debe ser lo mínimo posible. El tiempo de comunicación para sistemas de memoria compartida es dos veces el tiempo de acceso a la memoria, y para intercambio de mensajes en sistemas MIMD de memoria distribuida el tiempo de comunicación es la suma del tiempo para establecer comunicación (tiempo de latencia) mas el tiempo empleado para transmitir la información.

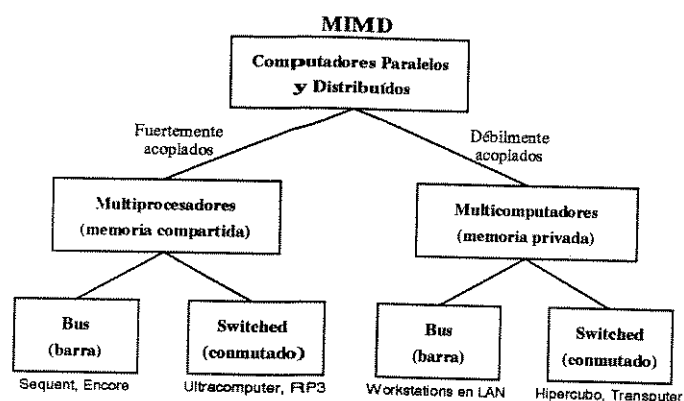


Figura 1: Una taxonomía de los sistemas computacionales MIMD.

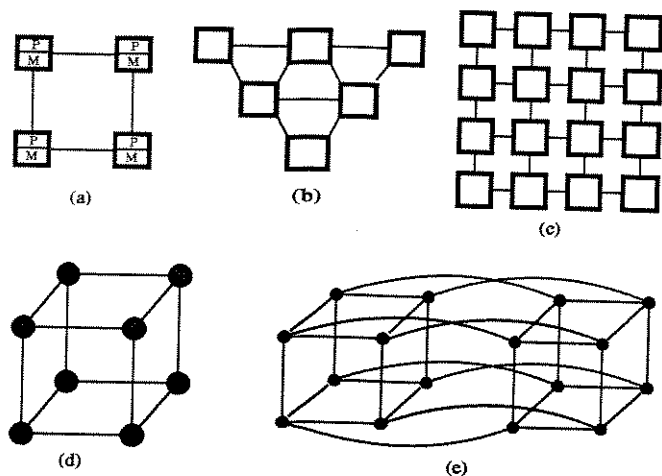


Figura 2: Multicomputadores de memoria distribuida: a) en anillo, b) en árbol, c) en malla, d) cubo, e) hipercono.

En general se tienen diversos tipos de paralelismo: vectorial, superescalar, flujo de datos, sistólico. Del mismo modo se tienen otras formas de procesamiento SIMD y MIMD. Hay varios tipos de cómputo, el escalar y distintas formas de cómputo paralelo. Aquí es bueno especificar el tipo de cómputo dirigido a la ejecución de una parte de una aplicación como *requerimiento de*

cómputo de aquella parte de aplicación particular. El tipo de cómputo soportado por alguna arquitectura se refiere al *modo de ejecución* de aquella arquitectura particular. Claro que tanto el requerimiento de cómputo como el modo de ejecución se corresponden.

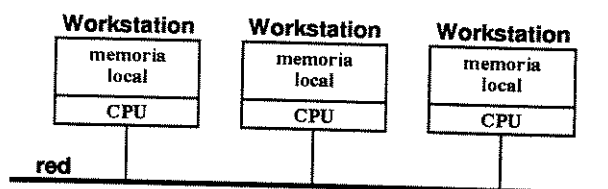


Figura 3: Multicomputadora en barra formada por estaciones de trabajo en una LAN.

Para ejecutar una carga homogénea es suficiente disponer de un sistema homogéneo factible cuyo modo de ejecución corresponda al requerimiento computacional exhibido. En cambio, para ejecutar una carga heterogénea con diferentes requerimientos computacionales, el problema se complica, este es el caso de gran parte de los centros de control de sistemas de potencia.

Un sistema de procesamiento distribuido es un conjunto de computadores interconectados por una red de comunicación de alta velocidad, constituyendo un ambiente de computación distribuida. La base de los sistemas de procesamiento distribuido vienen siendo las estaciones de trabajo y microcomputadores, aunque la posibilidad de interconectar inclusive computadores paralelos cada vez se va generalizando y mudando hacia el procesamiento heterogéneo.

Algunas ventajas de los sistemas de procesamiento distribuido son la escalabilidad, confiabilidad, compartir recursos y fundamentalmente costos menores en relación al procesamiento centralizado basado en *mainframe* e inclusive en relación a los supercomputadores multiprocesadores.

Se entiende por sistemas de computación heterogénea, los sistemas computacionales que soportan más de un modo de ejecución (escalar, vectorial, paralelos). Si se usa la taxonomía EM^3 (*Execution Modes/Machine Models*), basada en los modos de ejecución y los modelos de las máquinas, se distinguen las siguientes clases de sistemas de computación en general: SESM (Single Execution mode/Single machine Model), SEMM (Single Execution mode/Multiple machine Models), MESM (Multiple Execution modes/Single machine Model), MEMM (Multiple Execution modes/Multiple machine Models). Según ello, los sistemas heterogéneos pueden ser sistemas que soportan diferentes modos de ejecución al reconfigurar el mismo hardware (MESM) y sistemas que soportan diferentes modos de ejecución para diferentes modelos de máquinas (MEMM) [19].

Una gran parte del esfuerzo para desarrollo de software de sistema para el área de computación heterogénea está dirigida a los sistemas de la clase MEMM. La caracterización y clasificación del software de sistema puede ser vista bajo tres aspectos: a) soporte de heterogeneidad a nivel de red, de sistema operativo y de lenguaje, b) metodología de desarrollo de software, sea orientada a objetos (incluyendo polimorfismo) o no orientada a objetos, y c) técnicas de acceso de datos, que pueden ser sistemas heterogéneos que usan técnicas de direccionamiento convencional y los que usan técnicas de direccionamiento asociativo. Algunos ejemplos de software de sistema son: VISTAnet, Nectar, PVM (*Parallel Virtual Machine*), HBD (*Heterogeneous By Design*), VHAM (*Virtual Heterogeneous Associative Machine*), Linda, Actors, Paralation Lisp, PCN, etc.

como un recurso computacional concurrente flexible. Esos computadores pueden ser supercomputadores vectoriales, multiprocesadores de memoria local o memoria compartida, máquinas especializadas en gráficos, estaciones de trabajo escalares, que puedan estar interconectadas por una diversidad de redes, tales como Ethernet, FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*), etc. Los programas de las aplicaciones deben ser escritos en C, C++ o Fortran. Casi todos los computadores basadas en UNIX aceptan el PVM [25].

El estado del arte de los supercomputadores establece diferencias principalmente en las topologías de interconexión empleadas, algunas como el CRAY T3E usa un torus, IBM SP2 usa una red de conmutación, el Paragon una malla, etc. Por otra parte se observa la tendencia en adoptar procesadores usados microcomputadores y estaciones de trabajo como procesadores de los supercomputadores, ello está permitiendo un procesamiento superescalar que redundará en la portabilidad de las aplicaciones (programas) realizadas en computadores modestos como los PCs y desktops para ser usadas con cambios mínimos en los supercomputadores.

La tendencia actual en lo referente a las arquitecturas paralelas es la convergencia hacia computadores MIMD con memoria distribuida. El procesamiento tiende a ser paralelo y distribuido. En cuanto a los ambientes de software paralelo, se tiende a la estandarización, ya se tiene la fusión del PVM y MPI. Los lenguajes que dominan son el Fortran y el C++ para las aplicaciones. La tendencia en sistemas operativos es el UNIX y sus descendientes, son el estándar.

Para medir el desempeño de los computadores se cuenta con diversos *benchmarks* o problemas de prueba que determinan diversos indicadores a fin de evaluar inclusive la relación entre costo y desempeño. En la referencia [16] se utiliza software estándar de ecuaciones lineales para clasificar a modo de *ranking* una enorme lista de computadores que van desde los supercomputadores hasta los microcomputadores personales. Por otra parte, SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation), es una institución sin fines lucrativos formada para establecer, mantener y endosar un conjunto estandarizado de *benchmarks* relevantes que puedan ser aplicados a la más reciente generación de computadores de alto desempeño (<<http://www.specbench.org/>>).

Finalmente, no estaría demás dar una mirada en los 500 centros de computación de alto desempeño más avanzados en el mundo, pueden ser visualizados en uno de los *links* del URL de la referencia [30]. La novena lista TOP500 fue presentada en el marco de un evento de supercomputación (*Supercomputer'97 Conference*) llevado a cabo recientemente en Mannheim, Junio de 1997. La décima lista TOP500 será publicada en el *SC97 Conference* a realizarse en Noviembre de 1997 en San Jose, California, Estados Unidos.

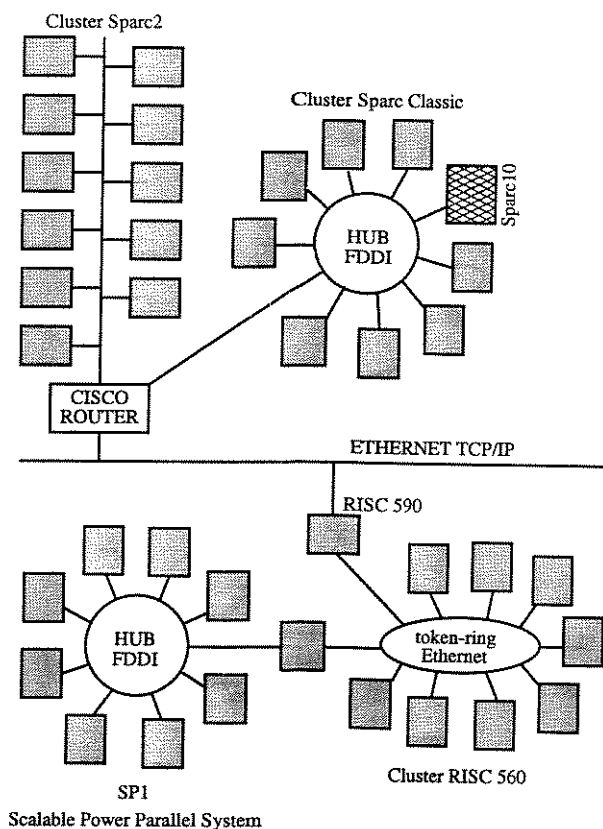


Figura 4: Un ambiente de computación distribuida.

El PVM ha sido utilizado en diversas aplicaciones de sistemas eléctricos de potencia [7, 1] y usando PPD, en la figura 4 el esquema de un típico ambiente para procesamiento distribuido. El software PVM puede ser copiado libremente a través de la Internet en el URL: <<http://www.netlib.no/>> o sino accediendo la página (*home-page*) dedicada al PVM localizada en el URL: <<http://www.epm.ornl.gov/pvm/pvm.home.html>>. El PVM es un sistema de software que posibilita que una colección de computadores heterogéneos sea usado

3 Centros de Control

Hay una clara interdependencia entre los centros de control de la energía y el desarrollo de la informática y computación. En los inicios, los centros de control apenas eran solo de supervisión y basados en sistemas electromecánicos, con harta información de indicaciones de estado (abierto/cerrado) de equipamientos, y valores analógicos a partir de los cuales el operador se permitía abrir o cerrar disyuntores, alterar el cambiador de derivaciones (tap) de los transformadores o realizar otros cambios en la red del sistema de potencia [56].

Posteriormente con el advenimiento de los computadores digitales, los centros de control comenzaron a ser equipados con sistemas basados en computadores (sistemas computacionales). Con ello surge la posibilidad de aumentar la adquisición de datos y dar lugar a los sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). La función de adquisición de datos suministraba el estado de los equipamientos y valores de las medidas analógicas tales como generación, flujo de potencia en las líneas, frecuencia, etc., todas ellas eran grabadas y mostradas. Otra función que realizaban los centros de control era el control automático de la generación. Desde entonces, los avances de la informática y computación vienen redundando en una continua modernización de los centros de control de la energía, que cada vez vienen sofisticando las funciones que realizan, no obstante básicamente no se han incrementado las funciones y aplicativos, exceptuando el del análisis de la seguridad dinámica on-line, que en los años recientes dió lugar a que algunos centros de control modernos los apliquen.

Entre las funciones que se realizan en un centro de control de la energía se tienen por ejemplo: control automático de la generación, flujo de potencia on-line, estimación de estado, monitor de seguridad, análisis de la seguridad estática, estabilidad transitoria y más recientemente análisis de la seguridad dinámica. A estas dos últimas se dará énfasis a continuación, analizando las opciones de procesamiento paralelo y distribuido como técnicas factibles de ser aplicadas a estas importantes funciones relativamente recientes en los centros de control modernos, que son más conocidos como sistemas de control EMS (*Energy Management System*) o sistemas de gerenciamiento de sistemas de potencia.

Una de las principales funciones de los centros de control es el análisis de la seguridad que se considera ligada con la economía. Esta función puede realizarse en tiempo real o en modo estudio y permite determinar en qué estado está operando el sistema a fin de tomar las acciones de control necesarias si el caso lo requiere. Los cuatro estados de un sistema que se mencionan en la figura 5 es una propuesta convencional [17], otra alternativa un tanto más ampliada es citada en [49].

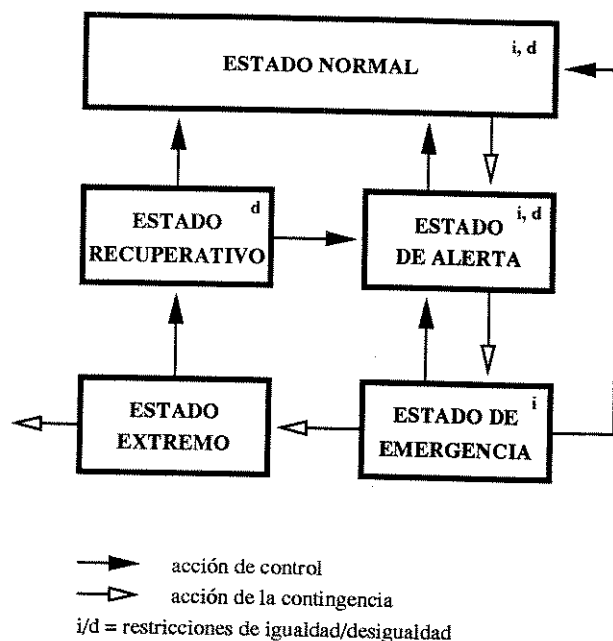


Figura 5: Estados de operación de un sistema de potencia.

El estado de operación normal corresponde al adecuado atendimento de todos los consumos mientras se cumplen las restricciones de operación de igualdad entre generación y carga, y de desigualdad correspondiente a los límites de tensión, límite de potencia reactiva, etc. En caso de producirse contingencias algunas originarán la violación de ciertas restricciones y el sistema pasará a emergencia. En el estado de alerta el sistema observa el cumplimiento de las restricciones pero está pendiente de una contingencia específica y quedar en estado de emergencia. En todos los casos una acción de control puede devolver el sistema a su estado anterior. No obstante es bueno aclarar que en el caso mostrado se está hablando de seguridad en el sentido estático, es decir no se está llevando en cuenta la evolución dinámica del sistema de potencia.

En la actualidad los modernos EMS están equipados con una cantidad apreciable de poderosas estaciones de trabajo operando bajo el sistema UNIX. El trabajo más pesado de las aplicaciones en tiempo real, son realizadas en un centro de control centralizado, las unidades terminales remotas RTU (*remote terminal unit*) hacen poco trabajo de cómputo, eso debiera mudar porque los microprocesadores actuales son poderosos y pueden realizar un apreciable procesamiento de datos a fin de aliviar el intenso procesamiento centralizado.

La dificultad de realizar sincronamente algunos cálculos cuando los procesadores están distribuidos geográficamente, lleva a pensar en la alternativa del procesamiento concurrente asíncrono. Los avances en

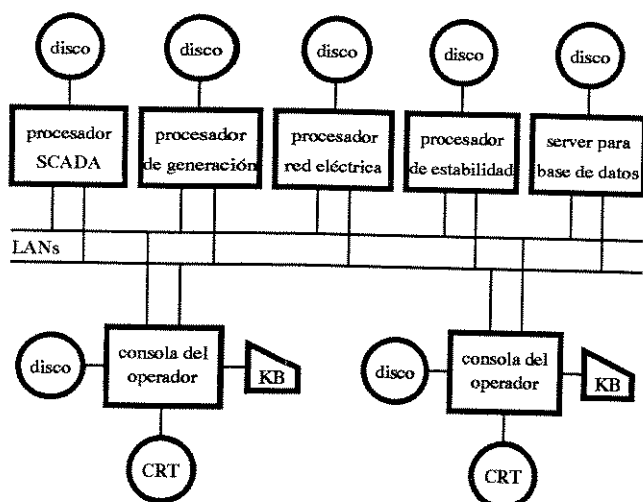


Figura 6: Configuración EMS incluyendo análisis de la estabilidad.

telecomunicaciones, tales como los sistemas de posicionamiento global, son una ayuda potencial para el procesamiento geográficamente distribuido. Las estaciones de trabajo de punta son multiprocesadores, es de suponer que los EMS las adoptarán, quien sabe próximamente los supercomputadores de teraflops formen parte de algunos centros de control, es decir, la arquitectura computacional está convergiendo hacia el modelo de memoria distribuida MIMD, que ya es común en los ambientes EMS.

4 Estabilidad Transitoria de Sistemas de Potencia

Los sistemas de potencia siempre están sometidos a algún tipo de perturbación, de pequeña y gran magnitud. Las pequeñas del tipo conexión y desconexión de cargas menores, se consideran de naturaleza aleatoria, frente a ellas el sistema suele reaccionar comportando una serie de oscilaciones y fenómenos electromecánicos que se ha dado en llamar el problema de la estabilidad a pequeña perturbación o estabilidad permanente. Si un sistema de potencia está operando cerca a su límite de estabilidad permanente, las perturbaciones pequeñas pueden originar oscilaciones de baja frecuencia con una consiguiente pérdida de la estabilidad síncrona del sistema, que de no combatirse llevarían hasta al colapso del sistema. Matemáticamente el problema de la estabilidad permanente, se representa por un conjunto de ecuaciones diferenciales linealizadas alrededor de un punto de operación en régimen permanente, el análisis de los valores propios y vectores propios es una herramienta adecuada para estudiar este tipo de estabilidad.

Una perturbación de gran magnitud es por ejemplo un cortocircuito trifásico en las proximidades del extremo de una línea de transmisión de alta tensión. Frente a estas perturbaciones, los sistemas de potencia se ven sometidos a severos fenómenos electromecánicos transitorios que pueden llevar a la pérdida de su sincronismo y consiguiente inestabilidad y colapso del sistema. Se dice que un sistema eléctrico de potencia es transitoriamente estable, si ante la ocurrencia de una perturbación grande específica, y para una condición de operación dada, el sistema continúa operando en sincronismo. En caso contrario se dice que es inestable transitoriamente [3, 4].

Los programas computacionales de análisis de la estabilidad transitoria son importantes porque constituyen la herramienta fundamental para el análisis de la seguridad dinámica [31, 36, 45]. Un programa eficiente y confiable va requerir del hardware adecuado, eso puede lograrse con un microcomputador y mejor aún con un supercomputador. Básicamente se disponen de dos clases de métodos para analizar la estabilidad transitoria, los indirectos (p.ej. simulación numérica paso a paso) y los directos que requieren calcular algún índice de estabilidad. El tiempo crítico de eliminación de la falta y la función de energía transitoria son los índices más utilizados.

Las técnicas de inteligencia artificial también se aplican en el análisis de estabilidad transitoria, entre ellas se tienen las que usan reglas del tipo sistemas expertos, árboles de decisión, redes neurales, etc. Por ejemplo una red neural (o neuronal) puede ser entrenada para calcular márgenes de energía transitoria o también para sintetizar tiempos críticos de despeje de faltas. [46, 21, 43, 44].

Para realizar un estudio de estabilidad transitoria primero se tiene que ejecutar un flujo de potencia, los resultados del estado del sistema serán utilizados por el programa de estabilidad transitoria.

4.1 Estabilidad Transitoria vía Simulación Numérica

El análisis de la dinámica de un sistema eléctrico de potencia se realiza mediante la aplicación de la segunda ley de Newton, matematicamente significa representar la red eléctrica y los generadores síncronos mediante un conjunto de n (es el número de generadores) ecuaciones diferenciales homogéneas y no lineales de segundo orden, denominadas ecuaciones de oscilación ($i = 1..n$).

$$M_i \ddot{\delta}_i = Pm_i - Pe_i - D_i \dot{\delta}_i = Pa_i \quad (1)$$

Esas ecuaciones diferenciales es factible desacoplarlas en dos conjuntos acoplados de ecuaciones diferenciales de

primer orden,

$$M_i \dot{\omega}_i = Pm_i - Pe_i - D_i \omega_i \quad (2)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (3)$$

En las ecuaciones 1, 2 y 3 se tiene que δ es el vector de ángulos de los rotores de los generadores, Pm es potencia mecánica, Pe es la potencia eléctrica, Pa es la potencia eléctrica acelerante, ω es el vector de velocidades angulares eléctricas de los rotores, mientras M es un coeficiente de inercia y D es una constante de amortiguamiento.

El sistema de ecuaciones 1 puede ser expresado en forma general por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (DIF) de primer orden y por otro conjunto de ecuaciones algebraicas (ALG) no lineales [4, 48]:

$$\dot{Y}_\alpha = F_\alpha(Y_\alpha, X_\beta) \quad (4)$$

$$0 = G_\alpha(Y_\alpha, X_\beta) \quad (5)$$

En donde Y_α es el vector que contiene las α variables diferenciales y X_β el vector que contiene las β variables algebraicas.

Prácticamente existen dos formas de resolverse las ecuaciones que modelan el problema de la estabilidad transitoria multimáquina, y que dependen del tipo de integración numérica utilizada, el método implícito y el explícito. La metodología explícita no es muy usada porque puede adolecer de problemas de estabilidad numérica y dificultades en el tratamiento de problemas rígidos. La integración numérica implícita puede a su vez realizarse en forma alternada o simultánea.

La metodología de integración numérica implícita alternada puede ser normal o entrelazada. En la normal las ecuaciones ALG son iteradas hasta obtener la convergencia después de varias iteraciones. En el entrelazado, ALG se itera solo una vez, y por ello DIF es iterado hasta obtener la convergencia. Otra alternativa es iterar DIF y/o ALG un número específico de veces.

La metodología de integración numérica implícita simultánea agrupa las ecuaciones diferenciales y algebraicas en un único conjunto de ecuaciones que luego son resueltas simultáneamente, las ecuaciones diferenciales son expresadas en la forma de ecuaciones de diferencias posibilitando formular una matriz jacobiana a fin de aplicar el algoritmo de solución de Newton. Debe aclararse que esta matriz jacobiana no es la misma que la matriz jacobiana del problema del flujo de potencia, la de estabilidad transitoria lleva en consideración la dinámica de los generadores. Cuando los elementos de la matriz jacobiana son mantenidos constantes a través de varios pasos de integración numérica se ha dado en llamar método de Newton muy deshonesto o VDHN (*Very Dishonest Newton Method*).

De todas maneras, en la solución de cualquiera de las dos metodologías, el problema central es resolver sis-

temas lineales del tipo $Ax = b$, estando la matriz A relacionada casi siempre con la matriz admitancia de la red Y . Debe recordarse que para sistemas multimáquina la adopción de conceptos de matrices y vectores dispersos es inevitablemente necesaria. Para resolver $Ax = b$ existen dos métodos, los directos basados en factores directos (LU) y/o inversos (W) y los iterativos tales como el Gauss-Jacobi y diversas variantes del Gradiente Conjugado [22].

Los métodos directos son superiores a los métodos iterativos cuando se usa procesamiento secuencial. Con **procesamiento paralelo** son los métodos iterativos que presentan mayores ventajas. En aplicaciones de gran escala implicando sistemas lineales de alto orden, por ejemplo 10^5 , puede suceder que el problema sea intratable vía métodos directos para gran parte de los computadores actuales, en cambio para los métodos iterativos sería factible. Diversos métodos y algoritmos paralelos [35] se han propuesto para resolver por simulación numérica el problema de estabilidad transitoria. Se distinguen en general tres métodos paralelos [22]: 1) paralelización espacial, Entre estos métodos se tienen el VDHN paralelo, que básicamente es una paralelización directa de las partes paralelizables, se consiguió un speed-up de 5.6 para 32 procesadores [8]. El método de la matriz W en el esquema simultáneo implícito, que usa particiones paralelas de los factores inversos W [40], produjo speed-up de 3.67, inferior al del VDHN paralelo, en una máquina iPSC de 32 procesadores [9]. Otro método es el método híbrido CG-LU que usa una combinación del gradiente conjugado con factores LU [12]. El método del gradiente conjugado completo, CG [12]. Estos métodos que usan el gradiente fueron probados en un computador iPSC860 y en el procesador transputer T800, los resultados indicaron que son competitivos con los métodos directos y presentan adecuada robustez, precisión y rapidez de cálculos; los speed-up en cambio fueron modestos. 2) de relajación de la forma de onda, en el que se descompone el conjunto de ecuaciones que describe la dinámica del sistema en subsistemas débilmente aplicados y se resuelve independientemente cada subsistema por varios pasos de integración [11]. 3) paralelización en el espacio y en el tiempo. Estos métodos se basan en la idea presentada en [2] en que las ecuaciones diferenciales son algebraizadas por varios pasos de integración o ventanas de integración, y luego se resuelven conjuntamente con las ecuaciones algebraicas de esta ventana por el método de Newton. Los métodos CG paralelo en el espacio y en el tiempo, incluyendo las versiones bi-conjugado y bi-conjugado stab fueron experimentados en [12, 13, 15]. Uso de preconditionamiento fue adoptado en estos métodos del gradiente conjugado. Otros métodos de esta clase son el método Gauss-Jacobi-Block-Newton, el de Newton relajado [26], etc. El procesamiento vectorial o paralelo se usa para tomar ventaja del paralelismo en el espacio, a

fin de acelerar los cálculos relativos a un paso de tiempo. La solución concurrente de varios pasos de tiempo se usa para explotar el paralelismo en el tiempo [34, 57, 54]. Por otro lado, el procesamiento distribuido fue estudiado y probado para los métodos VDHN y Shifted Picard usando el software PVM, las pérdidas de eficiencia en las aplicaciones en estaciones de trabajo ALPHA y en el computador IBM SP2 de 8 nodos fue de 15.12% y 10.84%, respectivamente, para un sistema de 511 generadores, según se refiere en [1].

Sea usando procesamiento secuencial o procesamiento paralelo y distribuido, el método de simulación numérica para el estudio de la estabilidad transitoria, es un método indirecto, que consiste en analizar la evolución en el tiempo de los ángulos de los rotores de los generadores, inmediatamente después de la ocurrencia de una gran perturbación.

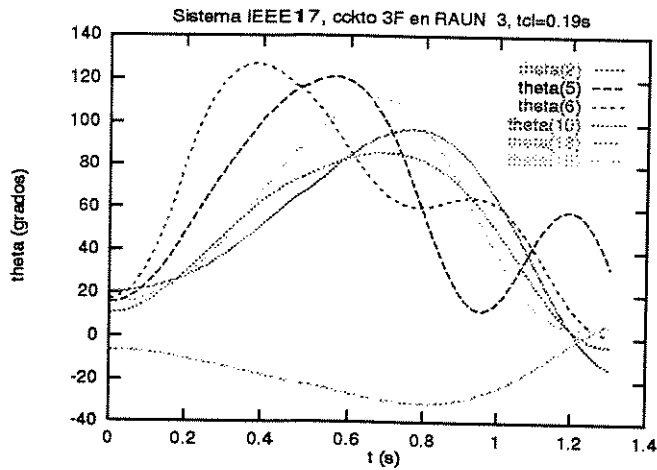


Figura 7: Sistema de potencia estable, cortocircuito trifásico despejado en $t=0.19s$.

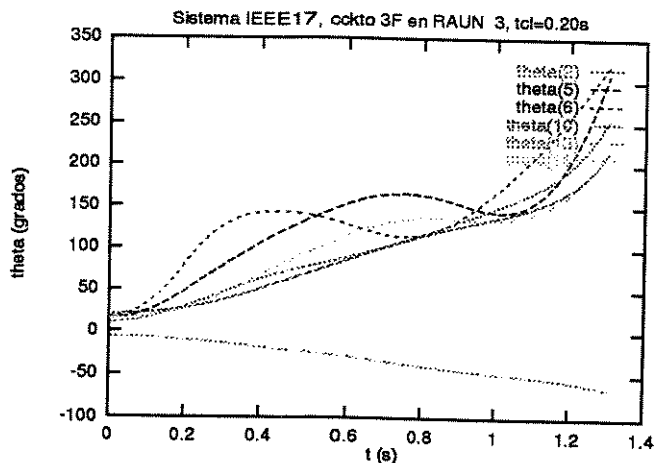


Figura 8: Sistema de potencia inestable, cortocircuito trifásico despejado en $t=0.20s$.

Si las curvas de oscilación de todos los rotores son amortiguadas decrecientes, el sistema es considerado estable

(figura 7). Si por lo menos una de las oscilaciones es creciente o no amortiguada, el sistema es declarado como inestable (figura 8). Existe un tiempo de despeje de falta crítico t_{cr} que para el caso del ejemplo mostrado estaría entre 0.19s y 0.20s. Si la falta es despejada antes de t_{cr} , el sistema será estable, de lo contrario será inestable. Las fallas normalmente son despejadas en algunos pocos ciclos, aproximadamente 0.1s. Los estudios de estabilidad transitoria suelen simular el sistema por algunos segundos, y en la integración numérica se usan pasos de integración del orden de 0.02s por ejemplo (pueden estar entre 0.005s y 0.5s) a fin de evitar oscilaciones numéricas e imprecisiones.

Además de la observación de los ángulos δ ($\theta = \delta - \delta_{COI}$, siendo COI el centro de inercia), también puede ser útil recoger información sobre el comportamiento de otras magnitudes como las energías transitorias (ver figura 9), VKet es la energía cinética del sistema, VPet es la energía potencial y VTEF es la energía transitoria total. Claramente se observa que una falla inyecta energía en el sistema, hasta el instante en que la falla es despejada o eliminada, después la nueva energía total del sistema se mantiene constante. Las energías cinética y potencial en este caso estable son amortiguadas, ello no ocurriría con un sistema inestable.

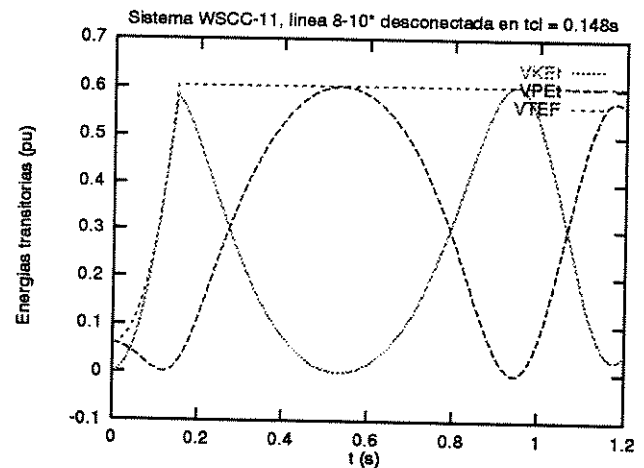


Figura 9: Energías transitorias de un sistema de potencia estable.

4.2 Estabilidad Transitoria utilizando Métodos Directos

Determinar la estabilidad transitoria de un sistema de potencia utilizando algún índice que directamente indique si el sistema es o no estable transitoriamente, es una preocupación que se remonta a varias décadas atrás [37]. El criterio de estabilidad basado en la igualdad de áreas de energía [32] es en sí un método de estabilidad directo. En la figura 10 se muestra un ejemplo de un sistema de una máquina frente a barra infinita, el

área A1 corresponde a una energía de aceleración y el área A2 a una energía de desaceleración, para que el sistema mantenga su estabilidad transitoria el área A1 tiene que ser menor que el área A2. El punto de equilibrio estable prefalta corresponde al ángulo δ^0 , y el punto de equilibrio estable postfalta corresponde al ángulo en SEP (*stable equilibrium point*), para el ejemplo el punto de equilibrio inestable postfalta UEP (*unstable equilibrium point*) es prácticamente el suplemento del ángulo en SEP. Si la falta es autodespejada (sin desconexión de línea), el SEP coincide con δ^0 porque la curva postfalta será idéntica a la curva prefalta. El criterio de igualdad de áreas también es factible aplicar al caso de sistemas de potencia multimáquina, una opción es considerar reducciones a fin de generar un sistema equivalente compuesto de dos máquinas, este criterio es conocido como criterio extendido de igualdad de áreas [44].

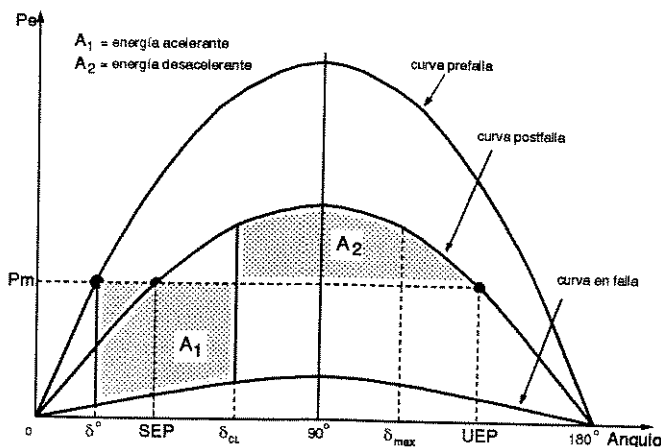


Figura 10: Estabilidad transitoria con el criterio de igualdad de áreas, sistema máquina y barra infinita.

Una función de energía V del sistema de potencia puede ser determinada integrando las ecuaciones de oscilación:

$$V(\theta, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^0}^{\theta_i^a} f_i(\theta) d\theta_i \quad (6)$$

$$V(\theta, \tilde{\omega}) = V_{EC}(\tilde{\omega}) + V_{EP}(\theta) \quad (7)$$

Son componentes de la función de energía V , la energía cinética V_{EC} y la energía potencial V_{EP} . En la figura 11 se muestra la analogía del método de la función de energía con el criterio de igualdad de áreas. Ahí la energía transitoria crítica es la energía potencial evaluada en el punto de equilibrio inestable de postfalta. Se define como el margen de energía transitoria la diferencia entre la energía crítica V_u y la energía transitoria en el instante tcl de despeje de la falta, V_{tcl} . Si se cumple que $V_{tcl} < V_u$ entonces el sistema se considera transitoriamente estable para ese tiempo de despeje tcl, sino será

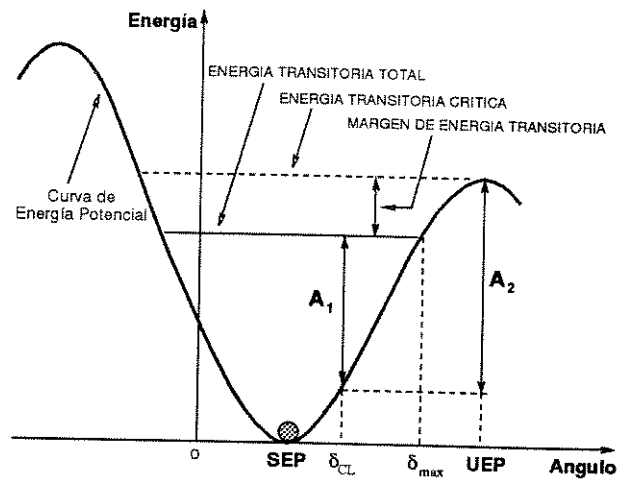


Figura 11: Estabilidad transitoria con el método de la función de energía, sistema máquina y barra infinita.

inestable. Estos conceptos también son válidos para sistemas multimáquina.

Los métodos directos que usan una función de energía transitoria son conocidos como métodos TEF (*Transient Energy Function*) y en cierta forma derivaron de la teoría de estabilidad de Lyapunov [41, 44]. Uno de los métodos TEF de mayor suceso, desarrollado analíticamente en el marco de la teoría matemática de los sistemas dinámicos, es el denominado BCU (*boundary of stability region based controlling unstable equilibrium point*) [10], el cual está basado en el criterio de la superficie límite de energía potencial PEBS (*Potential Energy Boundary Surface*) y el concepto de UEP de control [20, 5].

En los métodos directos también se tiene que integrar numéricamente las ecuaciones de oscilación, en la condición postfalta, hasta detectar el punto en que la trayectoria cruza el PEBS, luego se resuelve un sistema reducido gradiente y se determina el gradiente mínimo, que a su vez es usado como valor inicial para resolver la ecuación de oscilación en el punto de aceleración nula, y hallar el UEP de control. Con el UEP de control se calcula el margen de energía y se determina la estabilidad o inestabilidad del sistema. El cálculo del punto de equilibrio inestable postfalta que controla el modo de oscilación, no es una tarea trivial y en la actualidad se continúa investigando en busca de métodos más robustos, rápidos y eficientes.

El procesamiento paralelo y distribuido para la estabilidad transitoria con el método TEF considera básicamente dos tendencias, una que es la descomposición del problema identificando los trechos paralelizables, y otra que es resolver un problema en cada procesador.

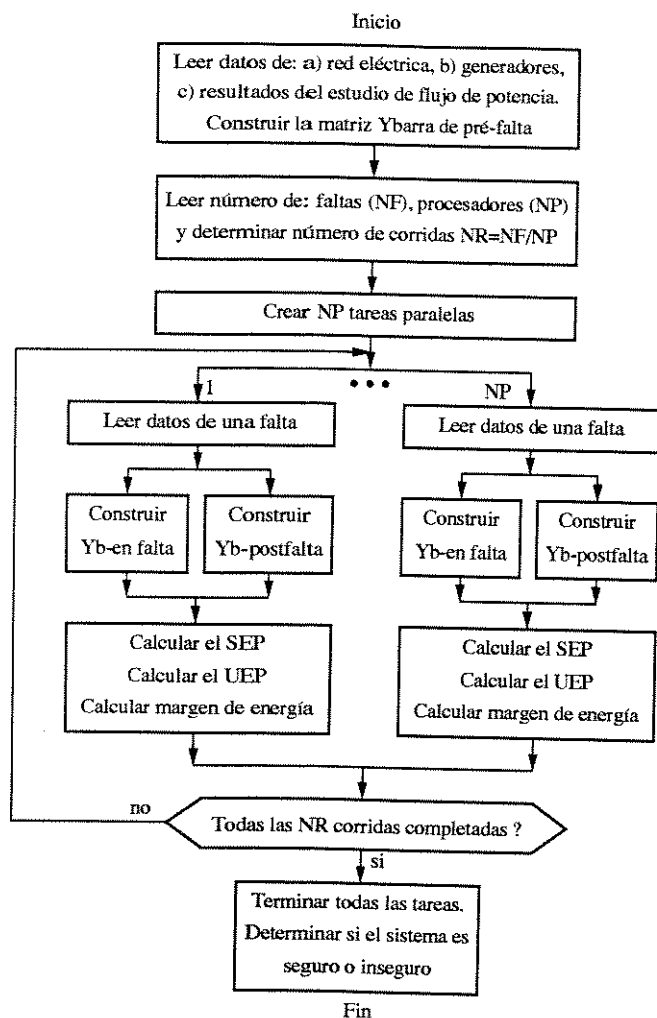


Figura 12: Estabilidad transitoria vía la función de energía y utilizando procesamiento paralelo.

Por ejemplo en el diagrama de la figura 12, considerando que cada falta es procesada por un procesador, en la referencia [53] se informa que ese esquema paralelo vía método TEF fue aplicado en el supercomputador IBM 3090-600E (con capacidad de procesamiento paralelo y vectorial) en el Cornell Theory Center y fue probado con un sistema de potencia de 50 generadores de la Ontario Hydro. Con 6 procesadores se consiguió una ganancia (speed-up) de 5.36 en 50 casos corridos. El supercomputador fue accesado desde la Iowa State University. La versión secuencial del programa de estabilidad usando la función de energía resolvió una contingencia en 6.04s. Si se adopta algún esquema para balancear la carga, por ejemplo usar una corrección para llevar en cuenta la velocidad de los procesadores, entonces el número de contingencias que procesará el procesador i (en un ambiente heterogéneo) será: $NC_i = NC * w_i / \sum w_j$ [27].

5 Seguridad Dinámica de Sistemas de Potencia

Seguridad en el sentido más amplio significa libre de peligro, de daño o de riesgo. Los sistemas de potencia no pueden ser seguros en el sentido absoluto, por tanto es común utilizar una referencia, es decir será seguro para un cierto número de contingencias o fallas caracterizadas adecuadamente. Así, la seguridad es la ausencia de riesgo o interrupción de la operación continua del sistema. En la práctica la seguridad viene a ser la capacidad de un sistema de soportar sin consecuencias serias una de las contingencias preseleccionadas en una lista de contingencias. Uno de los primeros en utilizar el término "seguridad" es T.E. Dy-Lyacco [17].

Un sistema de análisis de la seguridad dinámica en línea por lo general consiste en un conjunto de programas y facilidades computacionales, en un centro de control, con la finalidad de medir, determinar y controlar la seguridad del sistema. Dentro de ese conjunto de programas computacionales, los de estabilidad transitoria son los que hacen posible el estudio y comprensión de la dinámica del sistema ante la ocurrencia de perturbaciones severas.

El NERC (*North American Electric Reliability Council*), define la seguridad como la prevención de salidas en cascada cuando el suministro de energía representado por el sistema de transmisión, está sometido a perturbaciones severas. Esas salidas de servicio en serie no ocurrirán siempre y cuando: 1) el sistema haya sido planificado y operado de manera que en el sistema de transmisión se verifique que ningún equipamiento o circuito de transmisión está sobrecargado, 2) que no haya barras con tensiones fuera de los límites establecidos y 3) que después de la ocurrencia de la perturbación se verifiquen condiciones de operación aceptables en el régimen permanente [6, 23].

El análisis de la seguridad dinámica (ASD) se realiza para verificar que esas tres condiciones citadas están siendo cumplidas. Las dos primeras condiciones solamente requieren de un análisis en régimen permanente, en cambio la tercera condición requiere un análisis transitorio, por ejemplo un programa computacional de estabilidad transitoria. Algunos fenómenos de inestabilidad de tensión también son dinámicos por naturaleza y también requerirán de nuevas herramientas de análisis.

El interés del análisis de seguridad no es apenas la nueva condición de operación de post-perturbación en régimen permanente, sino también todo el evento de transición desde la condición inicial hasta la extinción de los efectos transitorios electromecánicos, ahí se verifica que la transición llevará a una condición de operación aceptable. En la actualidad, la mayor parte de los centros de control han limitado sus funciones de análisis de la se-

guridad a cálculos en régimen permanente y no se lleva en cuenta la dinámica del sistema, y no llega a conocer si el estado de postcontingencia fue alcanzado sin pérdida del sincronismo en alguna porción del sistema. Aunque el estado de régimen permanente postcontingencia haya sido evaluado en forma correcta, se necesita saber el modo real de inestabilidad para determinar posibles acciones que remedien la situación transitoria.

Si bien en el caso del análisis de la seguridad estática, la metodología típica es realizar algunos cálculos aproximados rápidos para filtrar las peores salidas que pueden ser analizadas por un flujo de potencia y con tiempos de procesamiento adecuados, en el análisis de la seguridad dinámica no es lo más conveniente usar esquemas de filtraje de la seguridad estática basados en índices de severidad, deberán usarse índices del tipo margen de energía que posibilite directamente un margen de estabilidad. El mayor problema que se tiene es el tiempo de procesamiento así como el desarrollo de programas computacionales eficientes, robustos y rápidos que permitan el cálculo de márgenes de estabilidad dentro del horizonte de tiempo previsto de algunos minutos para la realización del análisis de la seguridad dinámica. Hasta el momento los programas de estabilidad transitoria que usan la simulación numérica convencional no han demostrado la rapidez necesaria en la determinación de márgenes de estabilidad transitoria, no porque sean ineficientes sino por las obvias limitaciones de los recursos computacionales, eso significa, se necesita equipar a los centros de control con computadores aún más veloces y poderosos, idealmente es posible pero a un costo muy alto, si se piensa en la alternativa de los supercomputadores masivamente paralelos por ejemplo.

Una complicación adicional en el análisis de la seguridad se debe a la propia modernización de la industria de la energía eléctrica, hoy en día los sistemas de potencia son operados cerca a sus límites de seguridad (térmica, de tensión y estabilidad) y en forma continuada. Debido a ello una perturbación, inclusive de poca magnitud, puede deparar la aparición de otros modos de oscilación. Hay que tomar en cuenta también que las perturbaciones cada vez son mayores dada la magnitud de los sistemas de potencia actuales, ahora es usual referirse a perturbaciones de varias centenas de megawatts.

Para realizar el análisis de la seguridad dinámica on-line se debe disponer de una solución en régimen permanente para un caso base, y de una lista con las localizaciones de las faltas. Las faltas tienen que ser adecuadamente especificadas y se tiene que identificar las salidas esperadas mediante un estudio del comportamiento dinámico del sistema. Para viabilizar ese análisis es preciso un screening rápido a fin de descartar las faltas menos severas y que no comprometen la estabilidad transitoria del sistema ni las condiciones de régimen permanente en la etapa postfalta. Ese screening debe definir algu-

nas pocas decenas de peores perturbaciones, las cuales serán simuladas con mayor detalle. Al cabo de todo ello se determina la seguridad del sistema, un criterio implica que el sistema será seguro si todas las contingencias analizadas no originan inestabilidad, en caso contrario será declarado inseguro para determinadas contingencias. Con ese conocimiento de la seguridad puede procederse a realimentar el esquema del ASD adoptando acciones de control, por ejemplo redespachando algunos generadores, etc. Es una carrera contra el tiempo, se dispone apenas de unos 15, 30 o 40 minutos para el análisis de la seguridad. Una primera opción para el ASD en línea es utilizar las técnicas en el dominio del tiempo en computadores mas rápidos, poderosos y baratos, alternativas como estaciones de trabajo con tecnología RISC y el sistema operativo UNIX son potencialmente adecuadas, más aún porque permiten la adopción del procesamiento paralelo y distribuido en los centros de control de sistemas de potencia.

Una propuesta para un sistema de análisis de seguridad dinámica está esquematizada en la figura 13. El cernido o screening de contingencias puede ser efectuado con alguna de las técnicas de inteligencia artificial (sistemas expertos, redes neurales [39, 42], lógica difusa) o una combinación de ellas, o con el método TEF de la función de energía transitoria o la vulnerabilidad [24] derivada a partir de sensibilidades del método TEF; en esta etapa la adopción de métodos basados en el dominio del tiempo no parecen ser muy atractivos. La etapa de determinación de la seguridad y consecuentes recomendaciones, que consiste en determinar si el sistema es seguro o inseguro, además de obtener recomendaciones del tipo remediales por ejemplo, parecen que son más factibles para los métodos de simulación en el tiempo y con el apoyo de técnicas de inteligencia artificial y de la función de energía transitoria. la consecuente etapa de la presentación de resultados luce más favorable para los sistemas expertos y computación suave (*soft computing*).

Tal como se refirió en el ítem anterior, la herramienta esencial para el análisis de la seguridad dinámica como aplicativo, es un programa de estabilidad transitoria que permite evaluar la dinámica del sistema. Como tal continúan válidas las metodologías de la estabilidad para la determinación de la seguridad dinámica del sistema. Por ello que se menciona ASD mediante redes neurales, mediante la función de energía transitoria, etc. Sin embargo, pensando en la aplicación, no solamente es necesario referirse a rapidez o eficiencia de los cálculos, también es necesario pensar en la "dinámica" misma de la arquitectura en la que se aplicará el ASD. Por ello la propia característica del procesamiento paralelo y distribuido se torna un ambiente ideal de desarrollo del ASD. El ambiente de un centro de control EMS es un ambiente de computación distribuida DCE, por tanto es mejor realizar las simulaciones ya con esa perspectiva.

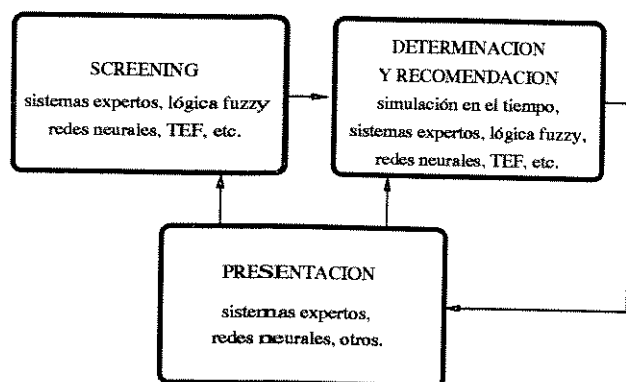


Figura 13: Proyecto de un sistema de análisis de seguridad dinámica.

Estudios realizados con ese objetivo permitieron experimentar prospectivamente el análisis de seguridad dinámica usando un programa de estabilidad transitoria convencional secuencial, en ambientes DCE. El esquema de solución adoptado siguió los lineamientos de un modelo SPMD, y fue realizado adoptando el PVM, que configura un conjunto de computadores heterogéneos interconectados, como un solo computador virtual paralelo. Unas 200 contingencias en un sistema de 320 barras y 46 generadores, pudieron ser analizadas en cinco minutos para un DCE como el de la figura 4, en ese ambiente el racimo (*cluster*) de estaciones de trabajo Sparc Classic no fue considerado, el racimo de Sparc-2 distante unos 600 metros del SP1 y del racimo RISC-560. Por otro lado, usando un DCE compuesto apenas por el racimo de Sparc Classic se procesaron 90 contingencias en 4.7 minutos. Estos resultados demuestran la factibilidad de usar procesamiento paralelo y distribuido para el análisis de la estabilidad transitoria on-line y de la seguridad dinámica, porque el ASD tiene un horizonte de tiempo de realización de más de 15 minutos para un sistema de esas características [7].

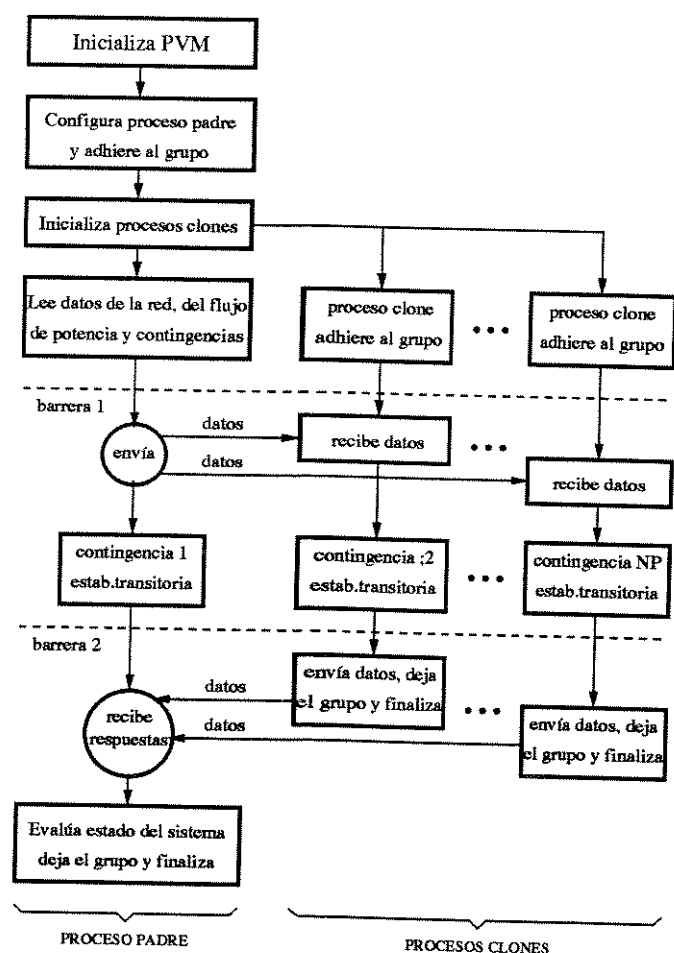


Figura 14: Un modelo SPMD en PVM para análisis de seguridad dinámica en ambiente de computación distribuida.

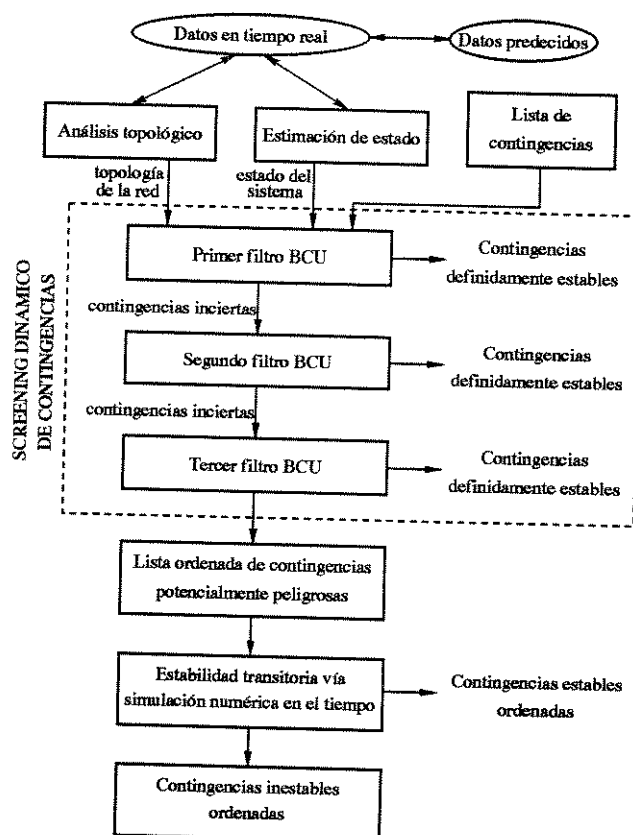


Figura 15: Una estructura para el ordenamiento, selección y *screening* de contingencias dinámica on-line.

Un estructura más refinada para el ASD, usando la metodología BCU de análisis de la estabilidad tran-

sitoria basada en funciones de energía transitorias, se muestra en la figura 15. Los filtros para el cernido de contingencias pueden ser por ejemplo el punto de cruzamiento del PEBS, el punto de gradiente mínimo y el punto de equilibrio inestable postfalta. Conforme se va calculando cada uno de ellos se puede ir filtrando las contingencias comprobadamente estables y dejando para el siguiente filtro aquellas no decididas. Al final se obtiene una lista con las contingencias estables e inestables ordenadas según el orden inverso de los filtros [10]. Nuevamente el criterio para declarar cuanto de seguro es el sistema serían los márgenes de estabilidad calculados por el esquema presentado. La aplicación del procesamiento paralelo y distribuido, es decir, un esquema similar al que se indica en la figura 14 es factible, e inclusive con la opción de adicionar la filosofía de un sistema de agentes para la solución distribuida de una lista intensa de contingencias.

La aplicación de la función de análisis de seguridad dinámica en el centro de control de la B.C. Hydro, una empresa eléctrica canadiense, es relatada en la referencia [14] y el esquema general usado corresponde prácticamente al de la figura 13. El modelo del sistema de potencia en donde se aplicó el ASD consiste de 230 generadores y 700 barras. Se propuso inicialmente un horizonte de 40 minutos para resolver 12 contingencias seleccionadas, tiempos de simulación alrededor de 1.5s. La realización inicial fue en una estación DEC corriendo en ULTRIX (a 20 specmarks) pero los resultados no fueron tan convincentes, ya con el software corriendo en un computador DEC AXP 3000/4000 (a 112 specmarks), se resolvieron 20 contingencias en 20 minutos, o sea, dentro de las expectativas de la B.C. Hydro. El sistema experto utilizado fue el CLIPS de la NASA. El procesamiento distribuido, afirman los autores del proyecto, mejorará ostensiblemente los tiempos de cálculo. A ello habría que sumar que en la actualidad las estaciones de trabajo más recientes tienen la opción de más de un procesador. El programa comercial PSS/E fue usado como la máquina de simulación de la estabilidad transitoria, potenciada con el método *second kick* o de segunda patada [38] como alternativa al BCU, y con análisis basado en reglas.

Durante las últimas tres décadas se han realizado esfuerzos con miras a la aplicación de la función de análisis de la seguridad dinámica on-line en los centros de control, no obstante, su reciente *implementación* práctica apenas se reduce a unos cuantos centros de control. Tal vez eso fue porque los computadores no eran tan rápidos, poderosos y de bajo costo, como era deseable, o porque el software de aplicación aún no tenía la eficiencia, precisión y confiabilidad requeridas, o sencillamente porque la integración de esta función no es tan simple de realizarse. Los requerimientos de diseño para la ejecución automática del ASD y para hacer la interfaz con información en tiempo real y con el operador, aún no han

sido perfectamente establecidas. El procesamiento paralelo y distribuido, o si se quiere sistemas heterogéneos con opciones de paralelización, vectorización y en ambiente de procesamiento distribuido, conjuntamente con técnicas computacionales eficientes de análisis de la estabilidad transitoria basados en métodos directos y de simulación, así como técnicas de inteligencia artificial, deberían posibilitar la aplicación del ASD, ya existe la propuesta del aprendizaje automático, lo cual significa de algún modo todo un procedimiento dinámico y automático, inclusive del operador, para mejorar lo que sería una simple salida de seguro/inseguro, y disponer de un índice de seguridad graduado [18] con características finales lingüísticas.

6 Conclusiones

Se consideran técnicas de computación de alto desempeño al procesamiento vectorial, procesamiento paralelo y procesamiento distribuido. En la actualidad, los supercomputadores masivamente paralelos y el procesamiento heterogéneo en ambientes de computación distribuida, están siendo aplicados paulatinamente en la solución de problemas complejos que exigen gran cantidad de cálculos en tiempos cortos y de forma eficiente. Eso significa que el concurso de más de un procesador es fundamental para acelerar el procesamiento de la información en aplicaciones de sistemas eléctricos.

En la parte de hardware, ahora se tienen en el mercado supercomputadores masivamente paralelos capaces de realizar más de 10^{12} operaciones de punto flotante en un segundo (teraflops). Por otro lado también se cuenta con poderosas estaciones de trabajo y computadores personales cuyos costos son ostensiblemente menores en relación a los supercomputadores y permiten ser operados en ambientes distribuidos alcanzando desempeños no muy distantes de los supercomputadores. En la parte de software existen sistemas que permiten configurar diversos computadores heterogéneos como una sola máquina paralela virtual, y también compiladores que posibilitan una relativa automatización en la vectorización y paralelización de las aplicaciones. La evolución de los lenguajes Fortran, C y C++ para versiones de alto desempeño, con comandos de paralelización y vectorización, también muestra una tendencia a la estandarización a finales de este siglo.

Los problemas asociados con el planeamiento, operación y control de los sistemas de potencia requieren por lo general de un procesamiento de información relativamente intenso, lo cual está llevando a adoptar técnicas de procesamiento paralelo y distribuido a fin de obtener soluciones adecuadas dentro de intervalos de tiempo permisibles. Los problemas de estabilidad transitoria, en las últimas dos décadas han comenzado a ser estudia-

dos y resueltos en forma más rápida y confiable, gracias a la aplicación del procesamiento paralelo y distribuido.

Los modernos centros de gerenciamiento de los sistemas de potencia, tan ligados al desarrollo de la informática y computación, también vienen sofisticando y ampliando sus funciones a fin de brindar un servicio adecuado y sin interrupciones. Funciones como estabilidad transitoria y análisis de la seguridad dinámica on-line, que usualmente eran relacionadas fuera de línea y con procesamiento secuencial, constituyen un objetivo alcanzable próximamente, aunque para ello es probable que solo una combinación de procesamiento paralelo y distribuido, inteligencia artificial y técnicas más eficientes de análisis de la estabilidad consigan plasmar en realidad esas importantes funciones relacionadas con la seguridad dinámica de los sistemas eléctricos de potencia.

Agradecimientos

El primer autor agradece el soporte del "Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico" (CNPq) del Brasil, así como también el apoyo de la UNI-FIEE, Lima, Perú.

Referencias

- [1] Aloisio G., Bochicchio M.A., La Scala M. and Sbrizzai R., "A Distributed Computing Approach for Real-Time Transient Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No.2, pp.981-987, May 1997.
- [2] Alvarado F.L., "Parallel Solution of Transient Problems by Trapezoidal Integration", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.3, pp.1080-1090, May/June 1979.
- [3] Anderson P.M and Fouad A.A., "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- [4] Arrillaga J., Arnold C.P. and Harker B.J., "Computer Modelling of Electrical Power Systems", John Wiley & Sons, 1983.
- [5] Athay T., Podmore R. and Virmani S., "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.2, pp.573-584, March/April 1979.
- [6] Balu N. et alii, "On-Line Power System Security Analysis", Proceedings of the IEEE, Vol.80, No.2, pp.262-280, February 1992.
- [7] Castro M., "Análise On-line da Estabilidade Transitoria de Sistemas Elétricos de Potência usando Ambientes de Computação Distribuída", Tese de Mestrado, UNICAMP-FEEC-DSEE, Campinas, Brasil, 1995.
- [8] Chai J.S., Zhu N., Bose A. and Tylavsky D., "Parallel Newton Type Methods for Power System Stability Analysis Using Local and Shared Memory Multiprocessors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.4, pp.1539-1545, November 1991.
- [9] Chai J.S. and Bose A., "Bottlenecks in Parallel Algorithms for Power System Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.1, pp.9-15, February 1995.
- [10] Chiang H.D., Chu C.C. and Cauley G., "Direct Stability Analysis of Electric Power Systems Using Energy Functions: Theory, Applications and Perspective", Proceedings of the IEEE, Vol.83, No.11, pp.1497-1529, November 1995.
- [11] Crow M.L. and Ilić M., "The Parallel Implementation of the Waveform Relaxation Method for Transient Stability Simulations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.3, pp.922-932, August 1990.
- [12] Decker I.C., Falcão D.M. and Kaszkurewicz E., "Parallel Implementation of a Power System Dynamic Simulation Methodology Using the Conjugate Gradient Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.1, pp.458-465, February 1992.
- [13] Decker I.C., Falcão D.M. and Kaszkurewicz E., "Conjugate Gradient Methods for Power System Dynamic Simulation on Parallel Computers", IEEE/PES 1995 Summer Meeting, paper No. 95 SM 506-6 PWRs, July 1995.
- [14] Demaree K., Athay T., Cheung K.W., Mansour Y., Vaahedi E., Chang A.Y., Corns B.R. and Garrett B.W., "An On-line Dynamic Security Analysis System Implementation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.2, pp.1716-1722, November 1994.
- [15] Dongarra J.J., Duff I.S., Sorensen D.C. and Van der Vorst H.A., "Solving Linear Systems on Vector and Shared Memory Computers", SIAM, 1993.
- [16] Dongarra J., "Performance of Various Computers Using Standard Linear Equations Software", <<http://www.netlib.org/benchmark/performance.ps>>, August 20, 1997.
- [17] Dy-Liacco T.E., "System Security: The computer's role", IEEE Spectrum, Vol.15, pp.43-50, June 1978.

- [18] Dy-Liacco T.E., "Enhancing Power System Security Control", IEEE Computer Applications in Power, Vol.10, No.3, pp.38-41, July 1997.
- [19] Ekmečić I., Tartajla I. and Milutinović V., "A Survey of Heterogeneous Computing : Concepts and Systems", Proceedings of the IEEE, Vol.84, No.8, pp.1127-1144, August 1996.
- [20] El-Abiad A.H. and Nagappan K., "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.85, No.2, pp.169-179, February 1966.
- [21] El-Amin I.M. and Al-Shams A.A.M., "Transient stability assessment using artificial neural networks", Electric Power Systems Research, Vol.40, No.1, pp.7-16, January 1997.
- [22] Falcão D.M., "Parallel and Distributed Processing Applications in Power System Simulation and Control", Controle e Automação, Vol.5, pp.124-143, Out/Nov 1994, Brasil.
- [23] Fouad A.A. (Chairman, IEEE Committee Report), "Dynamic Security Assessment Practices in North America", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.3, pp.1310-1321, August 1988.
- [24] Fouad A.A., Zhou Q. and Vittal V., "System Vulnerability as a Concept to Assess Power System Dynamic Security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.2, pp.1009-1015, May 1994.
- [25] Geist G.A., Beguelin A., Dongarra J., Jiang W., Manchek R. and Sunderam V.S., "PVM: Parallel Virtual Machine. A User's Guide and Tutorial for Network Parallel Computing", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1994.
- [26] Granelli G.P., Montagna M., La Scala M. and Torelli F., "Relaxation-Newton Methods for Transient Stability Analysis on a Vector/Parallel Computer", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.2, pp.637-643, May 1994.
- [27] Hao S., Papalexopoulos A. and Peng T.M., "Distributed Processing for Contingency Screening Applications", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.2, pp.838-844, May 1995.
- [28] Hwang K., "Advanced Computer Architecture", Ed. McGraw-Hill International Editions, Computer Science Series, 1993.
- [29] IEEE Committee Report, "Parallel Processing in Power Systems Computation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.2, pp.629-638, May 1992.
- [30] IEEE Computer Society's ParaScope, "A Listing of Parallel Computing Sites", <<http://computer.org/parascope/>>; Last updated: August 18, 1997; [accessed: August 20, 1997].
- [31] Kim J., "On-line Transient Stability Calculator", Final Report RP 2206-1 EPRI, Palo Alto, CA, March 1994.
- [32] Kimbark E.W., "Power System Stability", Vol.1, Wiley, New York, USA, 1948.
- [33] Kuhn D.H. and Padua D.A., "Tutorial on Parallel Processing", IEEE Computer Society, 1981.
- [34] La Scala M., Sblendorio G. and Sbrizzai R., "Parallel-in-Time Implementation of Transient Stability Simulations on a Transputer Network", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.2, pp.1117-1125, May 1994.
- [35] La Scala M., Sblendorio G., Bose A. and Wu J.Q., "Comparison of Algorithms for Transient Stability Simulations on Shared and Distributed Memory Multiprocessors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.4, pp.2045-2050, November 1996.
- [36] Lee S.Y., Chiang H.D., Lee K.G. and Ku B.Y., "Parallel Power System Transient Stability Analysis on Hypercube Multiprocessors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.3, pp.1337-1343, August 1991.
- [37] Magnusson P.C., "The Transient-Energy Method of Calculating Stability", AIEE Transactions, Vol.66, pp.747-755, 1947.
- [38] Mansour Y., Vaahedi E., Chang A.Y., Corns B.R., Garrett B.W., Demaree K., Athay T. and Cheung K., "B.C. Hydro's On-line Transient Stability Assessment (TSA). Model Development, Analysis and Post-processing" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.1, pp.241-253, Feb 1995.
- [39] Mansour Y., Vaahedi E., Chang A.Y., Corns B.R., Tamby J. and El-Sharkawi M.A., "Large Scale Dynamic Security Screening and Ranking Using Neural Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No.2, pp.954-960, May 1997.
- [40] Padilha A. and Morelato A., "A W-Matrix Methodology for Solving Sparse Network Equations on Multiprocessor Computers", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.3, pp.1023-1030, August 1992.
- [41] Pai M.A., "Power System Stability. Analysis by the Direct Method of Lyapunov", North-Holland Publishing Company, 1981.

- [42] Pao Y.H. and Sobajic D., "Combined Use of Unsupervised and Supervised Learning for Dynamic Security Assessment", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.2, pp.878-884, May 1992.
- [43] Paucar V.L. y Morelato A.L., "Cálculo de Índices de Estabilidad Transitoria y Permanente mediante Redes Neuronales", *I Jornadas Iberoamericanas sobre Inteligencia Artificial en Sistemas Eléctricos*, Cartagena, Colombia, Noviembre 1996.
- [44] Pavella M. and Murthy P.G., "Transient Stability of Power Systems", John Wiley & Sons, 1994.
- [45] Rahimi F.A., Balu N.J. and Lauby M.G., "Assessing Online Transient Stability in Energy Management Systems", *IEEE Computer Applications in Power*, pp.44-49, July 1991.
- [46] Sobajic, D.J. and Pao Y.H., "Artificial Neural-Net Based Dynamic Security Assessment for Electric Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.4, pp.220-228, February 1989.
- [47] Stagg G.W. and El-Abiad A.H., "Computer Methods in Power System Analysis", Pergamon Press, Macmillan, New York, USA, 1968.
- [48] Stott B., "Power System Dynamic Response Calculations", *Proceedings of the IEEE*, Vol.67, pp.219-241, February 1979.
- [49] Stott B., Alsac O. and Monticelli A.J., "Security Analysis and Optimization", *Proceedings of the IEEE*, Vol.75, No.12, pp.1623-1644, December 1987.
- [50] Taoka H., Iyoda I., Noguchi H., Sato N. and Nakazawa T., "Real-Time Digital Simulator for Power Systems Analysis on a Hypercube Computer", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.1, pp.1-10, February 1992.
- [51] Tanenbaum A.S., "Distributed Operating Systems", Prentice-Hall, Inc, NJ, USA, 1995.
- [52] Vaahedi E., Mansour Y., Chang A.Y., Corns B.R. and Tse E.K., "Enhanced Second Kick Methods for On-line Dynamic Security Assessment", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No.4, pp.1976-1982, November 1996.
- [53] Vittal V., Prabhu G.M. and Lim S.L., "A Parallel Computer Implementation of Power System Transient Stability Assessment Using the Transient Energy Function Method", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.6, No.1, pp.167-173, February 1991.
- [54] Wu J.Q., Bose A., Huang J.A., Valette A. and Lafrance F., "Parallel Implementation of Power System Transient Stability Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.10, No.3, pp.1226-1233 August 1995.
- [55] Youssefi J.A. and Zemoudeh K., "A Course in Parallel Processing", *IEEE Transactions on Education*, Vol.40, No.1, February 1997.
- [56] Zagari E.N., "Escalonamento em Tempo Real das Funções Avançadas de Análise de Rede Elétrica de um Moderno Centro de Controle", Tese de Mestrado, UNICAMP-FEEC-DSEE, Campinas, Brasil, 1995.
- [57] Zhu N. and Bose A., "A Dynamic Partitioning Scheme for Parallel Transient Stability Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.2, pp.940-946, May 1992.