EDSON APARECIDO ROZAS THEODORO

Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Análise de Segurança Dinâmica, no contexto da Estabilidade Transitória, de Sistemas Elétricos de Potência via Métodos Diretos

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís Fernando Costa Alberto

São Carlos
2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

T388d

Theodoro, Edson Aparecido Rozas
Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise de segurança dinâmica, no contexto da estabilidade transitória, de sistemas elétricos de potência via métodos diretos / Edson Aparecido Rozas Theodoro ; orientador Luís Fernando Costa Alberto. -- São Carlos, 2010.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Área de Concentração : Sistemas Elétricos de Potência) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Análise de segurança dinâmica. 3. Estabilidade transitória. 4. Métodos diretos. 5. PEBS. 6. BCU. 7. Ilhamento. I. Título

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro Eletricista **EDSON APARECIDO ROZAS THEODORO.**

Dissertação defendida e julgada em 10/03/2010 perante a Comissão Julgadora:

Luís Fernando Costa Alberto — APROVADO

Prof. Associado **LUÍS FERNANDO COSTA ALBERTO – (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Tatiana Lessa — APROVADO

Profª. Drª. **TATIANA MARIANO LESSA DE ASSIS**
(Universidade Federal Fluminense/UFF)

APROVADO

Prof. Dr. **RODRIGO ANDRADE RAMOS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Com muito amor dedico este trabalho
aos meus familiares e a todas as pessoas que
me ajudaram nesta caminhada pela pós-graduação.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus por estar sempre ao meu lado no caminho, por me mostrar sua luz, por me falar sua verdade e por me guiar em sua vida.

- Ao Professor Luís Fernando Costa Alberto por sua orientação, confiança, paciência e amizade durante o desenvolvimento deste trabalho o meu muito obrigado.

- Aos Professores Rodrigo Andrade Ramos e João Bosco Augusto London Júnior pelos ensinamentos que em muito fizeram enriquecer os meus trabalhos e pela amizade compartilhada durante estes últimos anos.

- Ao Professor André Cristóvão Pio Martins por sua disponibilidade para participar de minha banca de qualificação e por seus comentários que muito me fizeram aprender.

- A todos os colegas do Laboratório de Análise Computacional de Sistemas Elétricos de Potência (LACOSEP), em especial à Elmer Pablo Tito Cari, Moussa Reda Mansour e Raphael Augusto de Souza Benedito por seus ensinamentos, pela amizade compartilhada e pelos momentos vividos.

- A todos os meus Professores cujos ensinamentos me permitiram realizar muitos dos meus sonhos o meu muito obrigado.

- À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de estudo de mestrado concedida e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

"Toda impossibilidade é divisível em
muitas partes, cada uma das quais é possível."
Trecho retirado do *Manual Oficial da Legião de Maria*.

Resumo

Theodoro, Edson Aparecido Rozas (2010). *Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Análise de Segurança Dinâmica, no contexto da Estabilidade Transitória, de Sistema Elétricos de Potência via Métodos Diretos.* Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um programa computacional para análise de contingências, no contexto da estabilidade transitória, capaz de identificar as contingências críticas do sistema elétrico de potência via métodos diretos. A análise de estabilidade é realizada em diversas etapas, onde serão aplicados diversos filtros, baseados em métodos de análise de ilhamento, não existência de pontos de equilíbrio, PEBS, BCU e simulação computacional, no domínio do tempo, do sistema. Em cada etapa da análise, os casos serão classificadas como sendo estáveis, instáveis ou incertos segundo diferentes critérios, restando portanto, ao fim de cada etapa, um conjunto menor de possíveis contingências críticas. A metodologia proposta foi desenvolvida para modelos de SEPs com rede reduzida, porém as técnicas discutidas neste trabalho aplicam-se também a modelos que preservam a estrutura do sistema de transmissão.

Palavras-Chave: sistemas elétricos de potência, análise de segurança dinâmica, estabilidade transitória, métodos diretos, PEBS, BCU, ilhamento.

Abstract

Theodoro, Edson Aparecido Rozas (2010). *Design of a Computational Tool for Dynamic Security Analysis, in the context of Transient Stability, of Electrical Power Systems based on Direct Methods.* Dissertation (Master Thesis) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

The main objective of this work is to design a transient stability screening contingency program that is able to identify all critical contingencies in an electric power system using direct methods. The stability assessment is performed through several steps by mean of filters based on islanding detection, nonexistence of equilibrium points, PEBS, BCU and time-domain simulation of the power system. In each step of the analysis, all cases are classified as stable, unstable or uncertain cases by different criteria, resulting at the end of each step in a small number of possible critical contingencies. The proposed methodology was designed for reduced models of electric power systems, but all the techniques discussed in this work are also suitable for preserving structure models.

Key-Words: electric power systems, dynamic security assessment, transient stability, direct methods, PEBS, BCU, islanding.

Lista de Figuras

2.1 Estabilidade segundo Lyapunov. 17
2.2 Princípio da Invariância de LaSalle. 18
2.3 Extensão do Princípio da Invariância de LaSalle. 19
2.4 Método *Closest u.e.p.*. 25
2.5 Método *Controlling u.e.p.*. 26

3.1 Configuração usual para análise de estabilidade transitória de SEPs. 30
3.2 Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido. 33
3.3 (a) Região de estabilidade do sistema máquina versus barramento infinito e (b) componente potencial da função energia $V_p(\delta)$ do sistema máquina versus barramento infinito. 39
3.4 Falha no método PEBS. 40
3.5 Método BCU. 51
3.6 Algoritmo *Shadowing Method*. 53

4.1 Ferramenta Computacional para Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA, de SEPs baseada em métodos diretos. 60
4.2 Aplicação da Ferramenta Computacional para Análise de Segurança Dinâmica na Seleção de Casos enviados para a Simulação no Domínio do Tempo. 62
4.3 SEP composto de 3 barras e 4 ramos (exemplo para análise de ilhamento). 68
4.4 Filtro Classificador BCU 1. 76
4.5 Filtro Classificador BCU 2. 78
4.6 Filtro Classificador BCU 3. 79
4.7 Filtro Classificador BCU 4. 80
4.8 Filtro Classificador BCU 5. 81
4.9 Filtro Classificador BCU 6. 82
4.10 Filtro Classificador BCU 7. 83
4.11 Filtro Classificador BCU 8. 84

Lista de Tabelas

3.1 Estimativas do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido (análise clássica). 33

3.2 Estimativas do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido (método direto PEBS). 45

3.3 Estimativas do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido (método direto BCU + *Shadowing Method*). 54

4.1 Aplicação do filtro classificador para detecção de ilhamento no sistema sul brasileiro equivalente reduzido. 70

4.2 Aplicação do filtro classificador para detecção do a.s.e.p. pós-falta no sistema sul brasileiro equivalente reduzido. 73

4.3 Filtros classificadores responsáveis pela identificação de cada um dos casos de contingência definidos para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido. 85

4.4 Aplicação da ferramenta de avaliação de segurança dinâmica ao sistema sul brasileiro equivalente reduzido. 88

4.5 Comparação dos resultados obtidos pela ferramenta de avaliação de segurança dinâmica, aplicada ao sistema sul brasileiro equivalente reduzido, com as simulações no domínio do tempo. 89

4.6 Comparação entre os tempos de processamento da análise clássica de estabilidade transitória e da ferramenta computacional, baseada em métodos diretos, proposta neste trabalho. 90

Lista de Abreviaturas e Siglas

$(\cdot)^{\mathbf{f}}$	referência ao período em falta
$(\cdot)^{\mathbf{pf}}$	referência ao período pós-falta
$(\cdot)^{\mathbf{prf}}$	referência ao período pré-falta
$(\cdot)_{(\mathbf{gr})}$	referência ao sistema gradiente reduzido
$(\cdot)_{\mathbf{s}}$	referência ao ponto de equilíbrio assintóticamente estável
$(\cdot)_{\mathbf{u}}$	referência ao ponto de equilíbrio instável
Anarede™	Analisador de Redes (Programa do CEPEL)
a.s.e.p.	do inglês *asymptotic stable equilibrium point*
BCU	do inglês *Boundary Controlling Unstable Equilibrium Point Method*
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COA	do inglês *Center Of Angle*
c.u.e.p	do inglês *controlling unstable equilibrium point*
f.e.m.	força eletromotriz
m.g.p.	do inglês *minimum gradient point*
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico (Brasil)
ORGANON	Plataforma para avaliação de estabilidade dinâmica e de tensão de SEPs (Programa do ONS)
PEBS	do inglês *Potential Energy Boundary Surface Method*
p.u.	referência ao sistema de medida em Por Unidade
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional (Brasil)
TSA	do inglês *Transient Stability Assessment*
u.e.p.	do inglês *unstable equilibrium point*
VSA	do inglês *Voltage Stability Assessment*

Lista de Símbolos

$\natural\natural$	caso onde ocorre o ilhamento de um gerador síncrono conectado ao SEP
$\checkmark$	caso onde o a.s.e.p. da configuração pós-falta foi detectado pelo método de Newton-Raphson
$\triangle\triangle\triangle$	caso onde o PEBS não foi alcançado para um intervalo de tempo de simulação do sistema em falta de 1s
$\bullet\bullet\bullet$	caso onde o algoritmo *Shadowing Method* não conseguiu encontrar uma aproximação para o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido
$\oslash\oslash\oslash$	caso onde o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido não foi detectado pelo método de Newton-Raphson
$\otimes\otimes\otimes$	caso onde o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido foi detectado incorretamente
$\times$	caso onde uma determinada classificação não é realizada pelo filtro classificador especificado
$(\cdot)^t$	matriz transposta de $(\cdot)$
$(\cdot)^*$	conjugado complexo de $(\cdot)$
δ	desvio angular do rotor com relação a referência síncrona
θ	desvio angular do rotor com relação a referência do COA
$\Phi(x_0, t)$	trajetória (solução) do sistema dinâmico, iniciando em x_0 para todo o tempo t
Ω	região do espaço euclidiano $\mathbb{R}^n$
Ω_L	subconjunto limitado (pelo valor "L") e fechado de Ω
$\tilde{\omega}$	desvio da velocidade angular com relação a freqüência do COA
$\rho(\underline{\cdot})$	posto da matriz $(\underline{\cdot})$
ω	desvio da velocidade angular com relação a freqüência síncrona
$\partial A(x_s)$	fronteira da região de estabilidade $A(x_s)$
$A(x_s)$	região de estabilidade de x_s
$\underline{B}$	matriz susceptância do SEP
B	maior conjunto invariante
$\mathbb{C}^1$	conjunto das funções diferenciáveis cuja primeira deriva é contínua
C_{ij}	susceptância de transferência entre os nós "i" e "j"

C_λ	componente conexa de S_λ
$c(x)$	função contínua para todo $x \in \Omega$
D	coeficiente de amortecimento do gerador síncrono
D_{ij}	condutância de transferência entre os nós "i" e "j"
$\mathcal{E}$	conjunto de todos os pontos de equilíbrio de $f(\cdot)$
E_i	tensão elétrica complexa na barra "i"
E_{gi}	tensão elétrica complexa na barra interna do gerador "i"
$f(\cdot)$	função lipschitziana contínua por partes
$\underline{G}$	matriz condutância do SEP
$\underline{H}$	matriz incidência barra-ramo do SEP
$\underline{H}_F$	matriz incidência barra-ramo fatorada
$\underline{I}$	matriz identidade
I_{gi}	corrente elétrica complexa fornecida pelo gerador "i"
$\mathbb{K}$	corpo (estrutura algébrica)
K	conjunto formado pelos pontos $\{(\delta, \omega) : -\frac{3\pi}{2} < \delta < \frac{3\pi}{2},\ \dot{\delta} = 0\}$
L	valor crítico da função energia
M	momento de inércia do rotor do gerador síncrono
N	número máximo de iterações (ciclos) do algoritmo *Shadowing Method*
P_m	potência mecânica
P_e	potência elétrica
$\mathbb{R}$	corpo formado pelo conjunto dos números reais munido das operações de adição e multiplicação usuais
$\mathbb{R}^n$	corpo formado pelo conjunto das ênuplas reais $(a_1, a_2, \cdots, a_n)$, $a_i \in \mathbb{R}$, $i = 1, \cdots, n$, munido das operações de adição e multiplicação usuais para este conjunto
S_λ	subconjunto formado pelos pontos cuja função energia é limitada superiormente por "λ"
t	variável tempo
t_{ab}	tempo de abertura
t_{cr}	tempo crítico de abertura
$\hat{t}_{cr}$	estimativa do tempo crítico de abertura
$T_x(\cdot)$	espaço tangente de $(\cdot)$ no ponto "x"
$V(\cdot)$	função energia do SEP
$V_p(\cdot)$	componente potencial da função energia $V(\cdot)$
$V_k(\cdot)$	componente cinética da função energia $V(\cdot)$
$W^s(\cdot)$	variedade estável de $(\cdot)$
$W^u(\cdot)$	variedade instável de $(\cdot)$
x	variável de estado do sistema dinâmico

x_e	ponto de equilíbrio do sistema dinâmico
X	reatância indutiva da linha de transmissão/transformador
$\underline{Y}$	matriz admitância do SEP
$\mathbb{Z}_2$	corpo módulo-2

Sumário

Folha de Julgamento **iii**

Dedicatória **v**

Agradecimentos **vii**

Epígrafe **ix**

Resumo **xi**

Abstract **xiii**

Lista de Figuras **xv**

Lista de Tabelas **xvii**

Lista de Abreviaturas e Siglas **xix**

Lista de Símbolos **xxi**

1 Introdução **1**

1.1 Importância da Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência . . 1

1.2 Importância da Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA 4

1.3 Importância dos Métodos Diretos na Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA 5

1.4 Características Desejáveis dos Classificadores de Contingência em Tempo Real 6

1.5 Objetivos do Trabalho 7

1.5.1 Objetivo Geral 7

1.5.2 Objetivos Específicos 7

1.6 Estrutura Metodológica do Trabalho 8

1.7 Organização do Trabalho 8

1.8 Contribuições Originais deste Trabalho 9

2 Revisão Bibliográfica 11
2.1 Introdução 11
2.2 Análise Clássica versus Métodos Diretos: avaliações no contexto TSA . . . 11
2.3 Preliminares Matemáticas 13
2.4 Desenvolvimento dos Métodos Diretos Aplicados ao Estudo de Estabilidade Transitória 16
2.4.1 O Método "Closest Unstable Equilibrium Point" 22
2.4.2 O Método "Controlling Unstable Equilibrium Point" 24

3 Análise de Estabilidade Transitória - Modelos Reduzidos 27
3.1 Introdução 27
3.2 Modelagem para Análise Clássica de Estabilidade Transitória 27
3.2.1 Exemplo: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido 32
3.3 O método direto PEBS 37
3.3.1 Exemplo: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido 44
3.4 O método direto BCU 48
3.4.1 Exemplo: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido 54

4 Ferramenta para Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA, de SEPs - Modelos Reduzidos 59
4.1 Introdução 59
4.2 Ferramenta para Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA, de SEPs em Tempo Real 59
4.2.1 Filtro Preliminar para Detecção de Ilhamento 62
4.2.2 Filtro Preliminar para Detecção de Pontos de Equilíbrio Assintóticamente Estáveis no SEP pós-falta [22], [23] 72
4.2.3 Filtros Classificadores BCU 75
4.2.4 Filtro Complementar de Simulação no Domínio do Tempo 84
4.2.5 Exemplo: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido 85

5 Conclusões e Perspectivas Futuras 93
5.1 Comentários e Conclusões Finais 93
5.2 Contribuições Originais deste Trabalho 94
5.3 Perspectivas Futuras 94

Referências Bibliográficas 97

A Dados Estáticos e Dinâmicos dos SEPs Estudados 103
A.1 Descrição do formato de entrada de dados 103
A.2 Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido 103

B Notas sobre a Álgebra Módulo-2 **107**
B.1 Introdução à Estrutura Algébrica de um Corpo 107
B.2 Definições para o Corpo Módulo-2 108

C Publicações referentes a esta Pesquisa **109**
C.1 Congressos Internacionais 109
C.2 Congressos Nacionais 109

Capítulo 1

Introdução

1.1 Importância da Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência

Um sistema elétrico de potência (SEP) é absolutamente seguro se está completamente livre de riscos de interrupção do fornecimento de energia elétrica, ou seja, é robusto o bastante para manter o atendimento das cargas frente a ocorrência de qualquer tipo de perturbação.

Deste modo, um SEP nunca será absolutamente seguro, dado que sempre existirá uma pelo menos uma perturbação para a qual o sistema não conseguirá manter o atendimento às cargas intacto. Além disso, o crescimento da demanda e a interconexão entre diferentes sistemas, antes desconectados, fizeram com que a dimensão física dos SEPs e seus respectivos níveis de curto-circuito aumentassem, tornando-os mais propensos a ocorrência de um número cada vez maior de falhas e interrupções em seu fornecimento.

Assim, é impossível tanto do ponto de vista técnico como econômico, construir um SEP que seja robusto a qualquer tipo de perturbação em qualquer condição de operação. Portanto, a análise de segurança de um sistema se restringe a avaliar a sua robustez frente a uma determinada lista de contingências que, segundo a visão do operador do SEP, de fato apresentam grandes chances de ocorrer ou que teriam um grande impacto sobre o sistema caso ocorram.

A análise de segurança de um SEP tem como objetivo principal identificar, a partir de uma lista de contingências, definidas pelo operador do sistema, aquelas que são críticas ao sistema, ou seja, as que de fato irão instabilizar o SEP, caso ocorram.

Três são os elementos que compõem a análise de segurança de um SEP: monitoração, avaliação e controle, sendo estes melhores compreendidos nas seguintes tarefas [6]:

1. *Monitoração da segurança:* utilizando medidas em tempo real, provindas do SEP, deve-se identificar se o sistema está operando em condição normal ou não. Caso o SEP esteja em estado de emergência, ou seja, nem todas as restrições de operação

estão sendo atendidas, vá para o passo 4; caso o fornecimento de energia elétrica tenha sido interrompido, vá para o passo 5;

2. *Avaliação da segurança:* se o SEP está operando em condição normal, procede-se à avaliação de sua robustez, em relação à lista de contingências previamente selecionada, classificando então sua operação como normal segura ou insegura;

3. *Aumento da Segurança:* caso o sistema esteja operando em estado inseguro, ou seja, existe pelo menos uma contingência crítica para o mesmo, determina-se quais as possíveis ações a serem tomadas para aumentar o nível de segurança do SEP;

4. *Controle de Emergência:* caso o SEP esteja operando acima (ou abaixo) de algum limite de operação, executam-se as medidas necessárias para retornar o sistema à sua condição de operação normal;

5. *Controle de Restauração:* se o fornecimento de energia elétrica foi interrompido total ou parcialmente, executam-se as medidas necessárias para restaurar o atendimento às cargas do sistema.

A análise de segurança de um SEP é naturalmente dividida em duas fases: a análise de segurança estática e a análise de segurança dinâmica.

Na análise de segurança estática a principal preocupação é verificar se dada a ocorrência de uma perturbação e a sua respectiva mitigação, o sistema vai ou não possuir um ponto de operação onde todos os seus limites de tensão, carregamento e freqüência são atendidos. Do ponto de vista computacional, esta análise requer a resolução de um sistema de equações algébricas não lineares (equações do fluxo de carga[1]) para verificar a existência de tal ponto de operação.

Na análise de segurança dinâmica, a preocupação é se o sistema é capaz de suportar a ocorrência de uma perturbação, ou seja, se o SEP é capaz de assimilar a energia proveniente da mesma e atingir um novo ponto de operação normal após a sua eliminação. Computacionalmente, o sistema de equações agora envolvido é algébrico-diferencial (equações dinâmicas das máquinas + equações dos controles + equações do fluxo de carga), o que requer um esforço computacional, segundo [24], três ordens de magnitude maior que na análise de segurança estática.

Devido à grande complexidade desta última, a análise de segurança dinâmica é geralmente subdividida em dois contextos distintos: primeiramente no contexto da estabilidade transitória (TSA - do inglês *Transient Stability Assessment*) e no contexto da estabilidade de tensão (VSA - do inglês *Voltage Stability Assessment*). É importante ressaltar que a

[1] O processo de cálculo das tensões complexas nas barras de num SEP, a partir das injeções de potência e das demandas no mesmo, é conhecido como fluxo de potência ou de carga do sistema [43], [58].

análise de segurança dinâmica de um SEP apresenta outras divisões e subdivisões reportadas na literatura [35], dependendo do fenômeno e do intervalo de tempo sob estudo, porém neste trabalho apenas a primeira anteriormente citada será observada.

Na análise de segurança dinâmica, no contexto da estabilidade transitória, o objetivo é prever se, dada a ocorrência de uma contingência e a sua respectiva eliminação dentro do tempo de atuação do sistema de proteção do SEP, os geradores do mesmo irão se manter em sincronismo ou não. Já no contexto da estabilidade de tensão, o objetivo é prever se a ocorrência de uma dada perturbação no sistema vai conduzir o mesmo a um colapso (queda abrupta) dos níveis de tensão em suas barras[2] ou não.

Assim um SEP é dito dinamicamente seguro, para todas as contingências plausíveis de ocorrerem, se os seguintes requisitos são atendidos, após a eliminação das mesmas:

- Nenhum equipamento de transmissão permanece sobrecarregado;
- Nenhuma barra permanece fora dos limites de tensão pré-estabelecidos para o sistema (usualmente $\pm 5\%$ do seu valor nominal [6]);
- Um estado de operação normal é atingido após o desaparecimento dos transitórios eletromecânicos, ou seja, todos os limites de operação do sistema são atendidos.

Segundo o Conselho de Confiabilidade de Energia Elétrica Norte Americano [6], as três condições anteriores expressam o conceito de segurança dinâmica de um SEP, no sentido, de eliminar a possibilidade da ocorrência de desligamentos em cascata no sistema.

Portanto, pode-se destacar duas principais questões a serem respondidas pela análise de segurança em SEPs [6]: (i) como determinar os limites de segurança do sistema sob todas as condições de operação de interesse prático e (ii) como ter certeza de que a segurança do mesmo será mantida para todo o tempo.

Tais questões não possuem respostas simples para sistemas reais, uma vez que prever todas as possíveis condições de operação de um SEP e avaliar a sua segurança em cada uma destas situações é, hoje, uma tarefa computacionalmente proibitiva. Ressalta-se, então, a necessidade e a importância da criação de metodologias eficientes e rápidas o bastante para tornar a avaliação da segurança uma tarefa factível em tempo real[3] nos atuais centros de operação.

[2]Neste trabalho uma barra será definida como todo ponto de conexão de um equipamento ao sistema de transmissão [58].

[3]Neste trabalho o conceito de "tempo real" será utilizado para fazer menção ao intervalo de tempo em que o SEP permanece suficientemente próximo ao ponto de operação para o qual a análise de segurança dinâmica foi realizada, de forma a permitir que seus resultados ainda sejam válidos para o ponto de operação atual.

1.2 Importância da Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA

Um SEP está constantemente experimentando os mais diversos tipos de distúrbios, tais como: variações de carga, falhas em equipamentos, descargas atmosféricas, curto-circuitos, etc. Entre estes distúrbios, os curto-circuitos que ocorrem no sistema de transmissão geralmente classificam-se como grandes perturbações, pois causam uma alteração significativa na dinâmica dos geradores conectados ao sistema fazendo com que o mesmo passe a operar em condições significativamente diferentes e em muitos casos provocando também uma alteração topológica no SEP após a sua eliminação.

A ocorrência de curto-circuitos (faltas) no sistema de transmissão dos SEPs é freqüente devido às grandes dimensões dos mesmos, tendo as mais diversas causas, tais como o rompimento do isolamento elétrico de condutores por superaquecimento, falhas em equipamentos, intempéries, acidentes naturais, etc. Tais contingências provocam a atuação dos sistemas do proteção dos SEPs, responsáveis por desconectar[4] o(s) equipamento(s) sob falta dos mesmos, e com isso ocasionam, na maioria dos casos, mudanças nas topologias destes sistemas.

A análise de segurança dinâmica, no contexto da estabilidade transitória, tem por objetivo avaliar a robustez do SEP frente às possíveis contingências (curto-circuitos no sistema de transmissão e possíveis perdas de equipamentos) que possam vir a ocorrer no sistema, verificando, para tanto, se tais contingências, frente aos tempos de atuação dos respectivos sistemas de proteção, irão ou não instabilizar os geradores, e desta forma, a partir de uma lista de contingências críticas para o SEP sob análise, prever as possíveis intervenções que assegurem a continuação do fornecimento de energia elétrica.

Tal análise é extremamente dispendiosa do ponto de vista computacional, uma vez que o número de casos a serem verificados pode chegar a várias centenas ou mesmo alguns milhares em um SEP real. Deste ponto surgem as reais necessidades da análise de segurança dinâmica [6]:

1. *Diminuição do número de contingências a serem tratadas:* métodos eficientes de seleção de contingências devem ser empregados a fim de diminuir o número de casos a serem analisados, uma vez que as constantes mudanças topológicas dos sistemas fazem com que uma análise em tempo real seja requerida;

2. *Obtenção de limites de operação e segurança menos restritivos:* a utilização destes limites podem diminuir o número de casos sob análise e mesmo acelerar o processo de classificação dos mesmos;

[4]Modernos sistemas de proteção possuem estratégias de religamento, na tentativa de manter conectados elementos prioritários dos SEPs, tais como linhas de interligação (*tie-lines*), prevenindo com isso mudanças topológicas nos mesmos.

3. *Obtenção simplificada dos limites de segurança:* métodos analíticos devem ser empregados para a obtenção de tais limites, visando uma maior rapidez nos cálculos e uma respectiva redução do esforço computacional necessário aos mesmos;

4. *Priorização das "tendências do mercado de energia elétrica" e das constantes mudanças nos limites de operação e segurança dos SEPs:* as transações comerciais entre as diversas concessionárias e entre estas e os consumidores livres[5] e os produtores independentes[6], adicionam severas restrições contratuais ao fornecimento de energia elétrica e conseqüentemente sobre os limites de operação e segurança dos sistemas.

Das necessidade anteriores, nota-se que a busca por novos métodos, mais rápidos e eficientes, para seleção e classificação de contingências são uma real necessidade para tornar a análise de segurança dinâmica uma tarefa em tempo real nos atuais centros de operação dos SEPs.

1.3 Importância dos Métodos Diretos na Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA

Uma das necessidades na análise de segurança dinâmica é a velocidade, uma vez que esta necessita ser feita em tempo real, evitando desta forma que possíveis vulnerabilidades do SEP fiquem descobertas temporária ou mesmo indefinidamente, dado a grande quantidade de mudanças às quais estes sistemas estão sujeitos. Neste contexto, a utilização de métodos rápidos e eficientes na seleção e classificação de contingências tem papel fundamental, pois possibilita a análise eficiente de um grande número de contingências em um curto período de tempo.

Os métodos diretos aplicados ao estudo de estabilidade transitória de SEPs, baseados inicialmente na teoria de estabilidade de Lyapunov [42], têm a vantagem de possibilitar a obtenção do tempo crítico de abertura (t_{cr})[7], através de uma única simulação do sistema, a partir da avaliação de uma função escalar, ao longo da trajetória do sistema em falta, e sua respectiva comparação com um determinado valor limite, determinado a priori. Desta forma, evita-se a necessidade de diversas simulações para a determinação do t_{cr}.

Outra importante característica dos métodos diretos é a possibilidade de avaliar o grau de estabilidade (ou instabilidade) transitória de um SEP, frente a uma determinada

[5]Um consumidor é livre para escolher o seu fornecedor de energia elétrica, segundo a legislação em vigor no Brasil (lei $n^0$9.648/1998), se sua demanda for maior que 3000kW, sendo esta atendida em qualquer nível de tensão.

[6]Um produtor independente de energia elétrica é, segundo a legislação em vigor no Brasil (lei n^0 9.074/1995), todo aquele (pessoa física ou jurídica) que recebeu concessão, permissão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida.

[7]Tempo Crítico de Abertura: é o maior intervalo de tempo permitido para a eliminação da falta, para o qual o sistema pós-falta ainda é estável.

contingência, uma vez que a avaliação da estabilidade é realizada com base em uma função escalar, o que possibilita sua quantização, assim como o cálculo da sensibilidade da margem de estabilidade transitória do sistema em relação aos seus parâmetros.

Portanto, na análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, os métodos diretos propiciam a velocidade necessária às análises requeridas, uma vez que estes não necessitam da simulação do sistema no período pós-falta, possibilitando meios analíticos e numéricos menos custosos para a classificação das contingências.

Os métodos diretos têm sido amplamente estudados e aplicados para a avaliação da estabilidade transitória em SEP desde a década de 60, sendo uma das primeiras citações na literatura o trabalho de Gless [27] em 1966. Desde então diversos métodos foram propostos, entre eles os que mais se destacaram foram os métodos PEBS [5], [30], [31], [32] (do inglês *Potential Energy Boundary Surface*) e BCU [18], [20](do inglês *Boundary Controlling Unstable Equilibrium Point*).

Inicialmente os estudos concernentes aos métodos diretos restringiam sua aplicação a modelos reduzidos, para os quais muitas simplificações eram realizadas sobre a modelagem dos componentes do SEP. Atualmente, porém, muitos avanços têm sido feitos na tentativa de estender os métodos diretos para modelos mais realísticos [17], [21], [63], [66], que preservam a estrutura original dos sistemas elétricos de potência, aliando o Princípio da Invariância de LaSalle [38] às idéias de Lyapunov [42], e durante a última década através do uso da Extensão do Princípio da Invariância de LaSalle [51] para a criação de funções de energia [8], [56] que auxiliem o estudo de tais sistemas.

1.4 Características Desejáveis dos Classificadores de Contingência em Tempo Real

Neste trabalho uma ferramenta computacional para análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, em tempo real baseada em métodos diretos é proposta, porém, assim como na literatura [10] [22] [23], a simulação, no domínio do tempo, do SEP não pode ser completamente dispensada das análises dado o caráter conservador[8] dos métodos empregados. Ou seja, mesmo quando um caso é classificado como instável pelos mesmos, o mesmo pode ser estável, portanto tais casos são tratados como incertos e enviados para a simulação no domínio do tempo para uma correta classificação.

Desta forma, uma seqüência de filtros classificadores, baseados em métodos diretos, é proposta de forma a possibilitar uma rápida análise das contingências, fazendo com que em cada estágio da ferramenta a análise se torne mais acurada, porém o número de casos a serem analisados menor, deixando a simulação do sistema como última análise a ser

[8]Neste texto o termo "conservador" será empregado para fazer referência, quando da análise de estabilidade transitória, ao fato de que as estimativas para o tempo crítico de abertura ($\hat{t}_{cr}$) estão abaixo de seu valor verdadeiro (t_{cr}).

requerida em casos que não puderam ser classificados nas etapas anteriores.

Sendo, portanto, de fundamental importância, para a análise de segurança dinâmica em tempo real no contexto TSA, a correta avaliação da estabilidade do SEP frente as contingências previstas, os filtros classificadores desenvolvidos neste trabalho devem satisfazer alguns critérios, de forma a serem avaliados quanto ao seu desempenho na análise requerida [22], [23], [24]:

1. *Confiabilidade:* captura absoluta de todas as contingências críticas (casos instáveis), presentes na lista de contingências previamente selecionada pelo operador do SEP. Em outras palavras, a razão entre o número de casos classificados como instáveis e o número real de contingências críticas deve ser 1;

2. *Eficiência:* alta precisão na classificação de casos estáveis, ou seja, a razão entre o número de casos classificados como estáveis e o número real de caso estáveis do SEP deve ser tão próximo de 1 quanto possível;

3. *Velocidade:* rapidez na classificação de cada contingência;

4. *Robustez:* desempenho robusto com respeito às variações das condições de operação do sistema e às mudanças freqüentes de topologia do mesmo;

5. *Adaptabilidade em tempo real:* pequena necessidade de ajustes antes da inicialização da análise quando ocorrem variações no ponto de operação ou topologia do sistema.

Deve-se notar que como índice de eficiência foi tomado a avaliação sobre o número de casos estáveis, e não um índice de "falso alarme", que poderia ser definido como a razão entre o número de casos classificados como instáveis e o número real de casos instáveis, uma vez que em um SEP real, bem planejado e projetado, este último índice seria menos expressivo dado que o número de casos estáveis é muito maior que o de casos instáveis.

1.5 Objetivos do Trabalho

1.5.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional para análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, para SEPs utilizando métodos diretos.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Desenvolvimento de um esquema eficiente de classificação de contingências em tempo real que possibilite a análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, em SEPs de grande porte;

- Implementação de classificadores baseados em métodos diretos para SEPs de grande porte, utilizando funções energia numéricas para sistemas multimáquinas para modelos reduzidos [9].

1.6 Estrutura Metodológica do Trabalho

Este trabalho consiste na elaboração de uma ferramenta computacional para análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, para SEPs. Com este objetivo diversas técnicas propostas na literatura foram estudadas e os métodos diretos, para avaliação da estabilidade transitória de SEPs, foram selecionados tendo em vista sua velocidade na análise dos casos de contingência e a possibilidade de desenvolvimento de novas técnicas baseadas nos mesmos, dada sua profunda base teórica.

É importante mencionar que atualmente a análise de segurança dinâmica em tempo real já é uma realidade em diversos sistemas de grande porte por todo o mundo, como é o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN) no Brasil [28], cuja análise de segurança dinâmica é realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) com o uso da plataforma ORGANON [29], [49]. Porém dado o enorme esforço computacional requerido na avaliação de uma grande quantidade casos (da ordem de centenas a milhares em sistemas reais de grande porte) e às constantes mudanças no SEP, que fazem com que a análise de segurança dinâmica tenha de ser realizada em diversos instantes da operação do sistema, o número de casos (contingências) analisados ainda é limitado na operação em tempo real.

Desta forma, tendo em vista os benefícios da análise de segurança dinâmica em tempo real para os SEPs, os métodos diretos serão estudados e aplicados à análise de contingências, no contexto TSA, em tempo real.

Por fim, uma vez elaborada a ferramenta de análise de segurança dinâmica, esta será aplicada para análise de SEPs utilizando modelos reduzidos, a fim de verificar sua eficiência na aplicação ao estudo de segurança destes sistemas.

1.7 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos, de forma a prover ao leitor uma visão abrangente sobre o tema dissertado.

No capítulo 2, apresenta-se uma ampla revisão bibliográfica sobre os métodos diretos e sua aplicação à análise de estabilidade transitória. Neste capítulo também se encontram

[9] A nomenclatura "modelos reduzidos" refere-se ao processo de análise de estabilidade transitória, no qual todo o sistema de transmissão é reduzido aos nós internos das forças eletromotrizes (f.e.m.s) dos geradores conectados ao SEP, o que só é possível modelando todas as cargas do sistema sob análise como impedâncias constantes.

informações e um breve histórico a respeito das funções energia, elemento essencial para a aplicação e desenvolvimento dos métodos diretos utilizados no trabalho.

No capítulo 3, inicia-se uma discussão detalhada dos métodos diretos, mais especificamente os métodos PEBS e BCU, aplicados à análise de estabilidade transitória utilizando modelos de rede reduzida, ou seja, modelos onde a rede de transmissão é reduzida aos nós internos das f.e.m.s dos geradores.

No capítulo 4, a ferramenta de análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, é proposta e aplicada a SEPs, utilizando modelos reduzidos. Neste capítulo são discutidos e implementados alguns dos aspectos diversificados que compõem a ferramenta proposta, tais como os filtros preliminares para detecção de ilhamento[10] e não existência de pontos de equilíbrio no sistema pós-falta, assim como os filtros BCU que são a temática central deste trabalho e o classificador completar para simulação, no domínio do tempo, do SEP.

No capítulo 5, são feitas as conclusões a respeito do trabalho proposto e futuras perspectivas são discutidas, tais como a aplicação das idéias de análise de estabilidade transitória em duas escalas de tempo na análise de segurança dinâmica em tempo real.

Por fim, no apêndice deste trabalho, os dados referentes aos SEPs utilizados como exemplos ao longo do texto são fornecidos a fim de prover ao leitor uma forma de comprovação dos resultados aqui apresentados.

1.8 Contribuições Originais deste Trabalho

Este trabalho conta com duas contribuições originais à literatura de análise de segurança dinâmica de SEPs em tempo real:

1. Um novo método para análise de ilhamento em SEPs foi desenvolvido. Este novo método atende as exigências de velocidade e adaptabilidade para aplicações em tempo real, tendo como primordial vantagem a identificação de todos os possíveis casos de ilhamento, considerando a perda de um único equipamento, para o sistema sob análise;

2. Um novo classificador em tempo real, baseado em métodos diretos, foi desenvolvido com a finalidade de identificar, durante o período no qual o SEP encontra-se sob falta, oscilações estáveis das máquinas síncronas, e com isso identificar perturbações amenas ao sistema sob análise e aumentar a eficiência da ferramenta para análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, de SEPs proposta neste trabalho.

Ambas as contribuições são apresentadas e discutidas no capítulo 4 deste trabalho, de modo a elucidar e caracterizar os avanços obtidos durante a realização desta pesquisa.

[10] O termo "ilhamento" será utilizado neste trabalho para fazer referência à separação física do SEP em dois subsistemas disjuntos causada pela retirada de um equipamento do sistema de transmissão (linha de transmissão / transformador).

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se as principais características dos diferentes métodos diretos, aplicados à análise de estabilidade transitória, encontrados na literatura, tendo por objetivo avaliar as suas principais vantagens e desvantagens frente aos métodos clássicos de análise.

Ao longo das últimas décadas muitos esforços foram feitos na tentativa de viabilizar a análise de estabilidade transitória em tempo real, a fim de permitir a avaliação da segurança dinâmicas de SEPs. A maioria destas tentativas é baseada na utilização dos métodos diretos, buscando uma maior rapidez nas análises e a respectiva eficiência na implementação computacional dos métodos propostos.

Nas próximas seções deste trabalho, algumas das principais propostas para utilização de métodos diretos na análise de estabilidade transitória encontradas na literatura serão discutidas e comparadas a fim de expor suas principais características quanto a descrição do problema de estabilidade, as hipóteses utilizadas em seu estudo e as ferramentas de análise empregadas.

2.2 Análise Clássica versus Métodos Diretos: avaliações no contexto TSA

A análise clássica de estabilidade transitória [7], [34], [53] é realizada resolvendo-se numericamente um sistema de equações algébrico-diferenciais (EAD) que modelam o SEP, a fim de obter, para uma dada contingência, a resposta dinâmica dos gerados conectados ao sistema e determinar o tempo crítico de abertura para a mesma. Esta abordagem pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Modelagem dos componentes do SEP e definição da contingência sob análise;

2. Simulação do sistema na configuração em falta até o instante de abertura (t_{ab}) pré-determinado, geralmente tomado como tempo de atuação do sistema de proteção associado ao equipamento sob falta;

3. Simulação do SEP na configuração pós-falta até o tempo máximo desejado para a análise (usualmente 4s nas análises de estabilidade transitória);

4. Verificação do sincronismo entre os geradores conectados ao sistema e determinação da estabilidade.

Entre as vantagens da abordagem clássica para o problema de estabilidade transitória pode-se destacar [21]: (i) aplicabilidade a qualquer nível de detalhamento dos modelos dos componentes do SEP, (ii) disponibilidade das variáveis de estado durante o período transitório e em regime permanente e (iii) interpretação direta dos resultados, obtidos a partir das simulações, pelos operadores do sistema.

As principais desvantagens desta abordagem residem nos seguintes fatos [21]: (i) elevado esforço computacional empregado nas diversas resoluções de um sistema EAD, (ii) não provimento de informações à respeito da margem de estabilidade, ou instabilidade, do sistema e (iii) indisponibilidade de informações a respeito de possíveis ações de controle preventivas, quando da classificação do sistema como instável.

Os métodos diretos por sua vez, baseiam sua análise primordialmente nas idéias de Lyapunov [42], utilizando uma função escalar para quantificar e inferir características qualitativas relacionadas à estabilidade do sistema sob estudo. Desta maneira, tais métodos, aplicados à análise de estabilidade transitória de SEPs, possuem como principais vantagens [21]:

- pequeno esforço computacional requerido nas análises, quando comparado ao método clássico;

- avaliação da margem de estabilidade, ou instabilidade, do SEP;

- disponibilidade de informações a respeito das possíveis ações de controle preventivo, quando da classificação de casos instáveis.

A abordagem por métodos diretos também apresenta desvantagens [21], tais como: (i) necessidade de uma função energia adequada à modelagem do SEP sob estudo e (ii) indisponibilidade de informações sobre as variáveis de estado durante o período pós-falta. Porém tais dificuldades não fazem restrições à sua aplicação prática na análise de segurança dinâmica de SEPs, como será mostrado ao longo de todo este trabalho.

Uma observação deve ser feita quanto a existência de outras abordagens para análise de estabilidade transitória de SEPs, que se utilizam de algoritmos baseados em inteligência

artificial[1] (sistemas especialistas [45]) ou em inteligência computacional[2] (redes neurais artificiais [57] e sistemas fuzzy [44]).

Tais técnicas, comummente denominadas "técnicas inteligentes", não serão objeto de estudos neste trabalho, uma vez que estas apresentam restrições que impedem a sua utilização na análise de segurança dinâmica em tempo real, tais como: elevado tempo para o ajuste do algoritmo de classificação, impedindo que mudanças nos parâmetros do SEP sejam rapidamente incorporadas à análise, e necessidade de um amplo conhecimento da resposta dinâmica do SEP sob estudo para a determinação de padrões de classificação adequados, possibilitando assim a falha da análise quando da ocorrência de casos não previstos.

É importante mencionar que o uso de computação distribuída e paralela é hoje uma prática corrente na tentativa de tornar a análise de segurança dinâmica de SEPs uma aplicação em tempo real [28], [29], [49], uma vez que a análise de cada caso (contingência) pode ser considerada e implementada como uma tarefa independente e portanto concorrente[3], de modo a possibilitar o aumento do número de casos analisados dentro de um mesmo intervalo de tempo. Porém, o uso de computação distribuída / paralela não será observada neste trabalho, uma vez que sua aplicação à ferramenta para análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, aqui proposta é uma extensão natural, porém não trivial, de sua implementação sendo portanto deixada para trabalhos futuros.

2.3 Preliminares Matemáticas

Primeiramente, para uma melhor exposição das técnicas e conceitos apresentados adiante neste trabalho, alguns conceitos relevantes da teoria de sistemas dinâmicos não lineares devem ser revistos.

Neste trabalho, os SEPs serão tratados como sendo sistemas dinâmicos autônomos, ou seja, apresentam sua formulação matemática um campo vetorial que não dependente explicitamente da variável tempo[4], e numa primeira análise descritos apenas por equações diferenciais [11]:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) \tag{2.1}$$

[1] A nomenclatura "inteligência artificial" é utilizada para designar os primeiros algoritmos, baseados em reconhecimento de padrões, utilizados para inferência de informações, tais como: sistemas especialistas, aprendizado de máquinas, processamento de linguagem natural, visão computacional, etc.

[2] O termo "inteligência computacional" é empregado para fazer menção a uma nova classe de algoritmos bioinspirados, utilizados para inferência de informações, como por exemplo: redes neurais artificiais, sistemas fuzzy, algoritmos evolutivos,etc.

[3] O termo "concorrente" será utilizado, neste trabalho, para designar tarefas computadas ao mesmo tempo (paralelas) em diferentes processadores (ou núcleos).

[4] Esta hipótese encontra sua argumentação no fato das análises serem realizadas dentro de um intervalo de tempo onde todos os parâmetros físicos do SEP se mantém constantes, ou seja, desgastes mecânicos e imprecisões na atuação dos componentes são desconsiderados

Seja $x(t)$ pertencente ao espaço euclidiano[5] $\mathbb{R}^n$, e seja a função $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ lipschitziana contínua por partes[6]. A solução de (2.1) começando no ponto x_0, em t=0, é chamada trajetória do sistema e será denotada por $\Phi(x_0, \cdot) : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^n$.

Um ponto $x_e \in \mathbb{R}^n$ é um ponto de equilíbrio se e somente se $f(x_e) = 0$, sendo este ponto hiperbólico de tipo k, se a matriz Jacobiana, avaliada neste ponto, possuir k autovalores com parte real positiva e n-k autovalores com parte real negativa, e além disso se todos os autovalores possuírem parte real negativa então x_e é dito estável, caso contrário é dito instável. Neste trabalho o conjunto de todos os pontos de equilíbrio de (2.1) será denotado por $\mathcal{E}$.

Seja x_e um ponto de equilíbrio hiperbólico, suas variedades estável e instável podem ser definidas por:

$$W^s(x_e) = \{x \in \mathbb{R}^n : \Phi(x,t) \to x_e \;\; quando \;\; t \to +\infty\} \tag{2.2}$$

$$W^u(x_e) = \{x \in \mathbb{R}^n : \Phi(x,t) \to x_e \;\; quando \;\; t \to -\infty\} \tag{2.3}$$

É importante ressaltar que ambas as variedades $W^s(x_e)$ e $W^u(x_e)$ são conjuntos invariantes[7] [11].

Um ponto $x \in \mathbb{R}^n$ pertence ao conjunto ω-limite ($\omega(x_0)$) da solução $\Phi(x_0, t)$, se existe uma seqüência $t_i \subset \mathbb{R}$, com $t_i \to +\infty$ quando $i \to +\infty$ tal que:

$$x = \lim_{i \to +\infty} \Phi(x_0, t_i)$$

De maneira análoga, um ponto $x \in \mathbb{R}^n$ pertence ao conjunto α-limite ($\alpha(x_0)$) da solução $\Phi(x_0, t)$, se existe uma seqüência $t_i \subset \mathbb{R}$, com $t_i \to +\infty$ quando $i \to -\infty$ tal que:

$$x = \lim_{i \to -\infty} \Phi(x_0, t_i)$$

Os conjuntos $\alpha(x_0)$ e $\omega(x_0)$, anteriormente descritos, são conjuntos fechados[8] e invariantes. Tais conjuntos são amplamente utilizados na teoria de sistemas dinâmicos não lineares para caracterizar o comportamento em regime permanente destes sistemas.

Um ponto $x_e \in \mathcal{E}$ é assintóticamente estável se dado $\varepsilon > 0$ suficientemente pequeno, $\exists \delta(\varepsilon) > 0$, onde $\varepsilon, \delta \in \mathbb{R}$, tal que, para toda condição inicial, $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $\|x_0 - x_e\| < \delta$ implica em $\Phi(x_0, t) - x_e < \varepsilon$, para todo $t > t_0$ e além disso $\Phi(x_0, t) \to x_e$, quando $t \to +\infty$. Se δ puder ser escolhido arbitrariamente grande, então x_e é dito globalmente assintóticamente estável, porém a maioria dos sistemas dinâmicos não lineares não possui

[5] Um espaço vetorial real (definido sobre o corpo $\mathbb{R}^n$) é euclidiano se este é dotado de um produto interno [25].

[6] A condição de Lipschitz-continuidade por partes da função f é suficiente para provar a existência e unicidade das soluções para um intervalo de tempo arbitrário $[t_0, t_1]$ [33].

[7] Um conjunto M é invariante se e somente se toda trajetória de (2.1) começando em M permanece dentro deste para todo o tempo futuro.

[8] Um conjunto M é fechado se contém todos os seus pontos aderentes [39].

um ponto de equilíbrio globalmente assintóticamente estável. Desta forma, podemos definir um importante conceito no estudo de tais sistemas, denominado de região de estabilidade[9].

A região de estabilidade de um ponto $x_e \in \mathcal{E}$ assintóticamente estável é formada por todos os pontos do espaço $\mathbb{R}^n$ cujas trajetórias convergem para x_e, quando $t \to +\infty$, em outras palavras:

$$A(x_e) := \{x \in \mathbb{R}^n : \lim_{t \to +\infty} \Phi(x,t) = x_e\} \tag{2.4}$$

Topologicamente a região de estabilidade, de um ponto de equilíbrio assintóticamente estável, pode ser caracterizada como um conjunto aberto[10], invariante e conexo[11] [12].

Com isso, podemos definir a fronteira da região de estabilidade, ou simplesmente fronteira de estabilidade, denotada por $\partial A(x_e)$ como sendo o conjunto de todos os pontos cujas bolas abertas[12] $B(x,r)$, com $x \in \partial A(x_e)$ e $r > 0$ possuem pelo menos um ponto que pertence a região de estabilidade $A(x_e)$, e pelo menos um ponto que não pertence a mesma. Este conjunto é, topologicamente, um conjunto (n-1)-dimensional, fechado e invariante [12].

Outro conceito importante, utilizado ao longo deste trabalho, é a idéia de transversalidade [11]. Considere duas variedades $A, B \in \mathbb{R}^n$, diz-se que a intersecção entre A e B satisfaz a condição de transversalidade se a intersecção é nula, $(A \cap B) = \emptyset$, ou se para todo ponto $x \in (A \cap B)$, os espaços tangentes de A e de B, neste ponto, formam uma base para o espaço tangente do $\mathbb{R}^n$, ou seja:

$$T_x(A) + T_x(B) = R^n, \quad \forall x \in (A \cap B)$$

Por fim, serão apresentadas algumas hipóteses que irão caracterizar o problema de estabilidade transitória, ao qual se refere este trabalho, de modo a tornar possível o seu estudo a partir da utilização dos métodos diretos [11], [13].

(2.A1) Existência de um ponto de equilíbrio assintóticamente estável (a.s.e.p. - do inglês *asymptotic stable equilibrium point*) no sistema sob estudo;

(2.A2) Todos os pontos de equilíbrio, localizados na fronteira da região de estabilidade do a.s.e.p., são hiperbólicos;

(2.A3) A intersecção das variedades estáveis e instáveis dos pontos de equilíbrio, localizados na fronteira de estabilidade do a.s.e.p., satisfazem a condição de transversalidade;

[9] Na literatura este conceito também é encontrado sob a nomenclatura de área ou bacia de atração.

[10] Um conjunto M é dito aberto se todo ponto deste conjunto pertence ao interior de M [39].

[11] Um conjunto M é conexo (por caminho) se é possível encontrar uma parametrização que conecte dois pontos arbitrários de M, de forma que esta parametrização contenha somente pontos de M.

[12] Uma bola aberta $B(x_0, r)$ de centro em x_0 e *raio* $r > 0$, onde $x_0 \in \mathbb{R}^n$ e $r \in \mathbb{R}$, é definida como sendo o conjunto dos pontos $x \in \mathbb{R}^n$, tais que $\|x_0 - x\| < r$ [39].

(2.A4) Existência de uma função energia $V : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, de classe $\mathbb{C}^1$, ou seja, diferenciável e cuja derivada é contínua, para (2.1) tal que:

(i) $\dot{V}(\Phi(x,t)) \leq 0$;

(ii) Se $x \notin \mathcal{E}$, então o conjunto $\{t \in \mathbb{R} : \dot{V}(\Phi(x,t)) = 0\}$ tem medida zero sobre $\mathbb{R}$;

(iii) Se a trajetória $\Phi(x,t)$ tem um valor limitado de $V(\Phi(x,t))$, $\forall t \in \mathbb{R}^+$, então $\Phi(x,t)$ também é limitada.

A hipótese (2.A1) requer que o SEP contenha pelo menos um estado (condição de operação) onde todos os seus limites de operação e segurança sejam atendidos, e que este estado seja atingido (restaurado) toda vez que o sistema for exposto a um transitório momentâneo em seus parâmetros de rede, carga ou geração. Desta forma, o problema de estabilidade transitória é estabelecido e o seu estudo iniciado.

As hipóteses (2.A2)-(2.A4) são exigências requeridas para uma caracterização simplificada da fronteira de estabilidade do SEP, de forma a tornar possível o seu estudo através dos diversos métodos diretos propostos na literatura.

É importante observar que as hipóteses (2.A1) e (2.A2) são genéricamente satisfeitas, ou seja, valem para quase todo sistema dinâmico, enquanto as as hipóteses (2.A3) e (2.A4) devem ser verificadas caso a caso, uma vez que a condição de transversalidade a um parâmetro (condição essencial para a demonstração dos métodos PEBS e BCU como veremos a seguir neste trabalho) não é genéricamente atendida mesmo para modelos simples de SEP, como apresentado por Paganini e Lesieutre em 1999 [47], e a inexistência de uma função energia para sistemas com perdas no sistema de transmissão foi comprovada por Chiang em 1989 [16].

2.4 Desenvolvimento dos Métodos Diretos Aplicados ao Estudo de Estabilidade Transitória

Os métodos diretos têm sido aplicados à análise de estabilidade de sistemas dinâmicos desde o seu surgimento, com as idéias de Lyapunov [42], embora sua aplicação à análise de estabilidade transitória em SEPs só tenha iniciado seu desenvolvimento de maneira expressiva na literatura no início da década de 60. Desde então, com o aumento da complexidade destes sistemas, os métodos diretos têm encontrado um campo promissor na análise de segurança dinâmica dos mesmos.

A partir deste ponto a discussão a respeito dos métodos diretos, realizada neste trabalho, será realizada em duas perspectivas: uma com respeito ao desenvolvimento das técnicas de análise aplicadas à estabilidade transitória de SEPs e outra com respeito à existência de funções energia para tais sistemas.

Primeiramente, vale ressaltar uma importante propriedade dos sistemas dinâmicos [7], [33], sejam estes autônomos ou não: todo ponto de equilíbrio pode ser transladado para a origem[13]. Com isso, não há perda de generalidade em estudar a estabilidade da origem ao invés de estudar um ponto de equilíbrio genérico do sistema.

Desta maneira,no que diz respeito às técnicas de análise, os primeiros métodos diretos desenvolvidos tinham por base a fundamentação teórica criada por Lyapunov [42]:

Teorema 2.4.1 (Estabilidade no sentido de Lyapunov [7], [33], [42])**.** *Se o sistema dinâmico autônomo (2.1) admite uma função de Lyapunov* $V : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ *definida positiva*[14]*, para a qual* $\dot{V}(\Phi(x,t)) \leq 0$ *(*$\dot{V}(\Phi(x,t)) < 0$*) em alguma região* $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ *do espaço de estados contendo a origem, conforme a projeção mostrada na figura (2.1), então a origem é um ponto de equilíbrio estável (assintóticamente estável).*

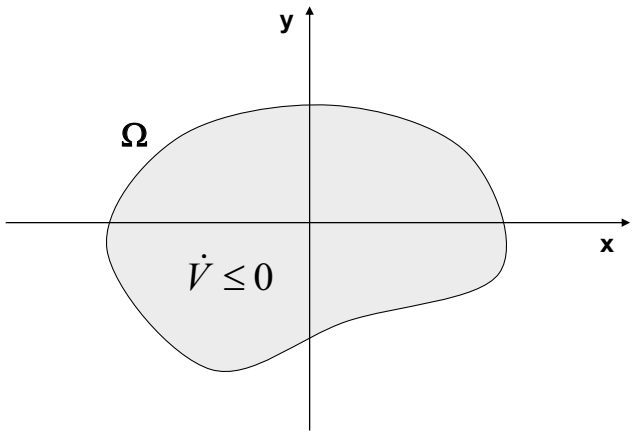

Figura 2.1: Estabilidade segundo Lyapunov.

Assim, uma vez encontrada uma função de Lyapunov para o sistema sob análise, pode-se concluir sobre a estabilidade de seus pontos de equilíbrio. Porém tal análise ainda é incipiente em dois aspectos: primeiro no sentido de que apenas a estabilidade de um determinado ponto de equilíbrio pode ser analisada, e segundo quanto à restrição de positividade imposta sobre a função de Lyapunov, tornando difícil ou mesmo impossível a sua obtenção.

Com o intuito de estender as idéias de Lyapunov e obter uma melhor caracterização para o problema de estabilidade, LaSalle [38] propôs em 1960 o seu trabalho sobre o princípio da invariância em sistemas dinâmicos autônomos:

[13] A demonstração deste fato é simples, pois seja o sistema dinâmico não autônomo $\dot{x}(t) = f(x(t),t)$, escolhendo $y(t) = x(t) - \phi(t)$, onde $\phi(t)$ é solução ($f(\phi(t),t) = 0$), facilmente chega-se em $\dot{y}(t) = f(y(t)+\phi(t),t) - f(\phi(t),t) = g(y(t),t)$ e portanto conclui-se que $y(t) = 0$ é solução do novo sistema. A demonstração para o caso autônomo é análoga.

[14] Uma função escalar V é definida positiva, em um conjunto Ω, se $V(0) = 0$ e $V(x) > 0$, $\forall x \in \mathbb{R}^n - \{0\}$.

Teorema 2.4.2 (Princípio da Invariância de LaSalle [7], [33], [38]). *Seja $V : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ de classe C^1, em alguma região $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, de modo que $\dot{V}(x) \leq 0$ e $V(0) = 0$. Para alguma constante real $\lambda \geq 0$, seja C_λ a componente conexa do conjunto $S_\lambda = \{x \in \Omega : V(x) \leq \lambda\}$ que contém a origem, admitindo que C_λ é um subconjunto fechado e limitado de Ω. Seja $E = \{x \in S_\lambda : \dot{V}(x) = 0\}$ um subconjunto de Ω e seja B o maior subconjunto invariante contido em E, conforme mostrado na projeção da figura (2.2). Então, toda solução de (2.1) começando em C_λ aproxima-se de B quando $t \to \infty$.*

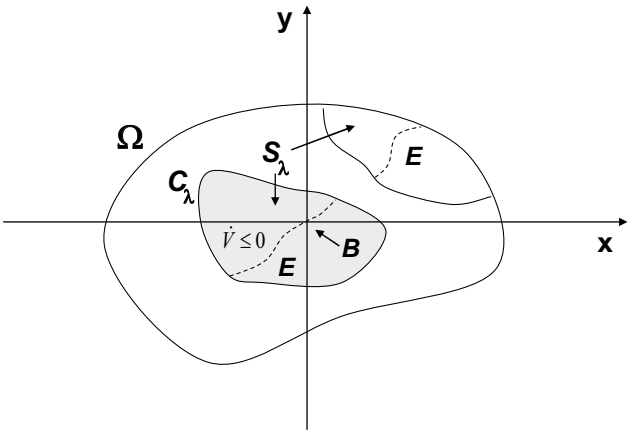

Figura 2.2: Princípio da Invariância de LaSalle.

O teorema anterior, devido à LaSalle, estendeu a teoria de Lyapunov no sentido de fornecer uma condição menos restritiva para a função V, não mais exigindo a positividade da mesma para provar a estabilidade assintótica de um conjunto invariante. Deste modo, o princípio da invariância mostra-se útil para provar a atratividade[15] de um ponto de equilíbrio, caracterizando-se assim como uma importante ferramenta auxiliar nas análises de estabilidade.

Outro avanço na teoria de estabilidade é devido a Rodrigues, Alberto e Bretas em 2000 [51], quando propuseram uma extensão ao princípio da invariância de LaSalle, para sistemas dinâmicos autônomos:

Teorema 2.4.3 (Extensão do Princípio da Invariância de LaSalle [51], [52]). *Seja $V : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ uma função de classe $\mathbb{C}^1$, e $c : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ uma função contínua em alguma região $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, de modo que $-\dot{V}(x) \geq c(x)$, $\forall x \in \Omega$. Para alguma constante real $L \geq 0$, seja $\Omega_L = \{x \in \Omega : V(x) < L\}$ que contém a origem, admitindo que Ω_L é um subconjunto limitado de Ω. Seja $A = \{x \in \Omega_L : c(x) < 0\}$, suponha que*

$$\sup_{x \in A} V(x) = l < L$$

[15] Um ponto de equilíbrio x^* é atrativo se $\exists \eta > 0$ tal que se $||x_0 - x^*|| < \eta$ então $\Phi(x_0, t) \to x^*$ quando $t \to +\infty$.

e seja $\bar{\Omega}_l$[16] $= \{x \in \Omega : V(x) \leq l\}$. *Defina* $E = \{x \in \Omega_L : c(x) = 0\} \cup \bar{\Omega}_l$ *um subconjunto de* Ω *e seja* B *o maior subconjunto invariante contido em* E*, conforme mostrado na projeção da figura (2.3). Então, toda solução de (2.1) começando em* Ω_L *aproxima-se de* B *quando* $t \to \infty$. *Além disso, se* $x_0 \in \bar{\Omega}_l$ *então* $\Phi(x_0, t) \in \bar{\Omega}_l$*, para todo* $t \geq 0$*, e* $\Phi(x_0, t)$ *tende para o maior conjunto invariante contido em* $\bar{\Omega}_l$*, quando* $t \to \infty$.

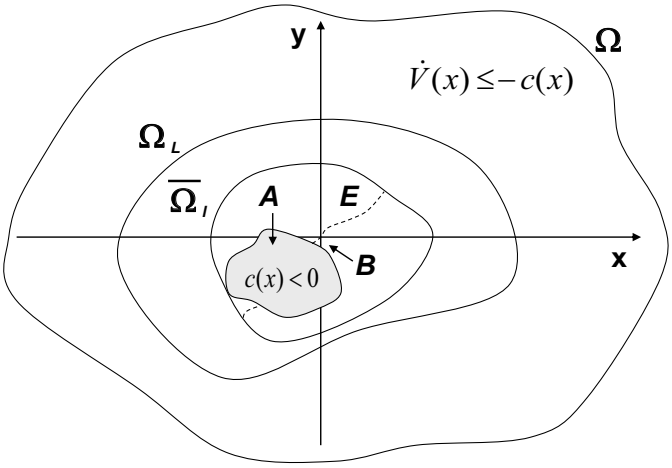

Figura 2.3: Extensão do Princípio da Invariância de LaSalle.

Nesta nova versão do princípio da invariância, condições muito menos restritivas sobre a função V foram impostas, permitindo agora que a mesma possua regiões onde sua derivada seja positiva, fato anteriormente não abrangido pelo princípio da invariância proposto por LaSalle em 1960 [38].

No que diz respeito à existência de funções de Lyapunov, muitos foram os esforços para encontrar uma função de Lyapunov adequada à análise de estabilidade transitória em SEPs, [5], [27], [30], primeiramente para modelos reduzidos. Tais esforços, baseados no cálculo da energia (1ª integral) do sistema, foram bem sucedidos tanto do ponto de vista teórico como prático.

Porém, com a crescente interligação dos SEPs e o aumento da demanda destes sistemas, simulações mais acuradas tornaram-se necessárias, para tanto um maior detalhamento dos modelos e um maior enfraquecimento das hipóteses utilizadas nos estudos de estabilidade foi exigido. Com o aumento da complexidade dos modelos a busca por novas funções de Lyapunov fez-se necessária.

Desde então, muitas tentativas foram feitas na intenção de obter funções de Lyapunov para modelos de rede preservada[17]; [11], [31], [32], [36], [62]. Porém, tais funções de Lyapunov são locais [16], mostrando-se eficientes apenas para determinar a estabilidade de

[16] A notação $\bar{M}$ indica o fecho do conjunto M, em outras palavras, é o conjunto formado por todos os pontos aderentes a M ($\bar{M} = int(M) \cup \partial M$) [39].

[17] A denominação "modelos de rede preservada" vem do fato de que, agora, o sistema de transmissão não é reduzido aos nós das f.e.m.s dos geradores, durante a análise de estabilidade transitória, permitindo assim que as perdas no sistema de transmissão e diversas modelagens tanto para os geradores como para as cargas conectadas ao SEP sejam consideradas.

um determinado ponto de equilíbrio, e não podendo ser diretamente aplicadas na determinação da região de estabilidade, característica essa exigida e amplamente explorada no desenvolvimento de diversos métodos diretos, tais como o PEBS [5], [30] e o BCU [18], [20].

Com o desenvolvimento da teoria de estabilidade para sistemas dinâmicos autônomos, algumas das restrições impostas sobre as funções de Lyapunov foram transpassadas, porém o desenvolvimento dos métodos diretos requeriu uma melhor aproximação da região de estabilidade, e um novo conceito relacionado às funções escalares utilizadas no estudo de estabilidade surgiu.

O conceito de função energia, proposto por Chiang, Wu e Varaiya em 1985 [11], satisfazendo às condições referidas em (2.A4), foi desenvolvido de forma a prover as condições necessárias ao estudo de estabilidade.

É importante notar que uma função de Lyapunov não satisfaz as condições da definição de uma função de energia e vice-versa. De modo que encontrar uma função energia para um modelo de um SEP pode se tornar uma tarefa de esforço igual ou superior ao de buscar uma função de Lyapunov para o mesmo, porém essencial ao desenvolvimento dos métodos PEBS e BCU.

Neste ponto, é relevante mencionar que a existência de uma função energia para um sistema dinâmico implicaria na existência de apenas dois tipos de comportamentos assintóticos: (i) convergência para um ponto de equilíbrio e (ii) divergência para o infinito.

Assim, sendo um SEP um sistema dinâmico não-linear, complexo e de grande porte é razoável esperar que este exiba diversos tipos de comportamentos assintóticos, tais como órbitas caóticas e ciclos limites, como já comprovado diversas vezes na literatura [19], [40], impossibilitando, então, a existência de uma função energia, definida sobre todo o espaço de estados $\mathbb{R}^n$, para tais sistemas.

Com o trabalho de Chiang [16] em 1989, ficou provada a inexistência de funções energia para SEPs multimáquinas considerando perdas no sistema de transmissão (condutâncias de transferência, nos modelos reduzidos, diferentes de zero). Contudo, Chiang demonstrou a existência de funções energia locais, definidas sobre qualquer compacto[18] no espaço de estados, para tais sistemas, permitindo assim uma aproximação local da região de estabilidade através do seu uso.

Embora a existência de funções energia locais para SEPs tenha sido comprovada na literatura [16], não existe um método sistemático para exibir tais funções em sistemas de ordem[19] maior que 2. Deste modo a busca por um método sistemático para determinação de funções energia para SEP, considerando modelos de rede preservada, ainda constitui um desafio na pesquisa dos métodos diretos.

[18] Um conjunto M é compacto sobre o $\mathbb{R}^n$ se o mesmo é fechado e limitado [33].

[19] A ordem de uma equação diferencial ordinária é dada pela ordem da maior derivada presente na equação diferencial.

Alguns avanços na determinação de funções energia para SEPs com perdas foram feitos nos últimos anos [8], [56], baseados na extensão do princípio da invariância de LaSalle [51]. Estes avanços mostram-se como contribuições importantes à literatura, uma vez que propostas de funções energia, considerando perdas no sistema de transmissão, tornaram-se escassas após o trabalho de Chiang [16] em 1989.

Uma vez discutida a importante questão a respeito da existência de funções energia, resta a discussão sobre às técnicas de análise desenvolvidas especificamente para a análise de estabilidade transitória de SEPs.

Conceitualmente, todos os métodos diretos propostos na literatura, baseados nas idéias de Lyapunov e LaSalle, apresentam de uma ou outra forma as seguintes etapas [2]:

1. Uma estimativa da região de estabilidade do ponto de equilíbrio assintóticamente estável do sistema pós-falta é obtida na forma $\Omega_L = \{x \in \mathbb{R}^n\} : V(x) < L\}$;

2. A equação diferencial que descreve o sistema em falta é numericamente resolvida até que a função energia do sistema, $V(x)$, atinja o valor crítico L. O tempo $\hat{t}_{cr}$ em que essa situação ocorre é uma estimativa do verdadeiro tempo crítico de abertura para a contingência sob estudo.

Deste modo, a primeira dificuldade a ser evidenciada na literatura é como obter o valor L, em outras palavras, como obter a melhor aproximação para a região de estabilidade, de modo a obter estimativas menos conservadoras tanto quanto possível.

Entre as técnicas, propostas na literatura, para determinar o valor crítico L, destacam-se os esforços realizados por diversos pesquisadores [26], [65] no sentido de obter um equivalente dinâmico, adequado ao estudo de estabilidade transitória, para um sistema multimáquinas na forma de um sistema máquina versus barramento infinito.

Tais técnicas, tentam a partir de análises preliminares do SEP sob estudo determinar, frente a uma determinada contingência, dois grupos de máquinas distintos: um apresentando um comportamento instável e outro estável. Reduz-se então o SEP a um equivalente dinâmico composto apenas por duas máquinas e daí segue-se a redução ao sistema máquina versus barramento infinito, onde uma função energia exata é conhecida e, portanto, aplicada ao estudo de estabilidade deste sistema.

A fragilidade destas técnicas reside no fato de que muitas suposições de caráter prático são feitas na obtenção dos modelos equivalentes. Desta forma, resultados teóricos que possibilitem a generalização dos resultados obtidos não podem ser obtidos e portanto não existem garantias que assegurem a robustez destas técnicas frente às constantes mudanças nos parâmetros do SEP.

Na busca por tais resultados teóricos, o desenvolvimento dos métodos diretos tem se guiado na direção de possibilitar uma melhor caracterização da região de estabilidade, ou mais especificamente, da fronteira da região de estabilidade. Uma vez que, um maior

conhecimento desta é necessário à determinação adequada do valor crítico L, pois dada uma contingência, é necessário conhecer o valor da função energia V no ponto em que a trajetória do sistema em falta abandona a região de estabilidade do sistema pós-falta.

Com isso em mente, muitos pesquisadores propuseram diversos meios para encontrar uma estimativa adequada do valor crítico L. Entre as muitas propostas [7], algumas requerem o cálculo aproximado de todos os pontos de equilíbrio instáveis (u.e.p. - do inglês *unstable equilibrium point*), localizados ao redor do ponto de equilíbrio assintóticamente estável (a.s.e.p. - do inglês *asymptotic stable equilibrium point*) sob estudo, e propõem diversos critérios, em sua maioria baseados em constatações físicas relacionados ao SEP sob estudo, tais como o critério dos modos de instabilidade[20] [7], [34] e o critério da aceleração[21] [7].

As principais desvantagens nas propostas anteriores residem obviamente na necessidade do cálculo de todos os u.e.p.s ao redor do a.s.e.p. sob estudo, assim como na falta de resultados analíticos que possam fornecer condições suficientes para garantir a eficácia dos mesmos, como no caso do critério da aceleração, e na utilização de estimativas excessivamente conservadoras da região de estabilidade, como no caso do critério dos modos de instabilidade.

2.4.1 O Método "Closest Unstable Equilibrium Point"

Entre os métodos propostos na literatura, um dos mais estudados foi o *Closest Unstable Equilibrium Point* (em português Ponto de Equilíbrio Instável mais Próximo). Este método toma como valor crítico o u.e.p. energeticamente mais próximo ao a.s.e.p., de forma a prover uma estimativa da região de estabilidade.

Chiang, Wu e Varaiya [11] derivaram, em 1987, uma condição necessária e suficiente para que, em um sistema dinâmico autônomo, satisfazendo as condições (2.A1)-(2.A4), um u.e.p. esteja na fronteira de estabilidade de um a.s.e.p., e com isso uma caracterização da fronteira da sua região de estabilidade foi obtida:

Teorema 2.4.4 (Condição necessária e suficiente para um u.e.p. estar na fronteira de estabilidade de um a.s.e.p. [11])**.** *Para um sistema dinâmico autônomo, na forma de (2.1), satisfazendo as hipóteses (2.A1)-(2.A4), um u.e.p.* x_u *está na fronteira de estabilidade* $\partial A(x_s)$*, de um a.s.e.p.* x_s *se e somente se* $W^u(x_u) \cap A(x_s) \neq \emptyset$

Teorema 2.4.5 (Caracterização da fronteira de estabilidade [11])**.** *Para um sistema dinâmico autônomo, na forma de (2.1), satisfazendo as hipóteses (2.A1)-(2.A4), sejam*

[20] O "critério dos modos de instabilidade" propõe que se utilize como energia crítica (L) o menor valor da função energia avaliada nos pontos de equilíbrio instáveis associados à aceleração de uma única máquina do SEP.

[21] O "critério da aceleração" propõe que se utilize a energia crítica (L) o valor da função energia no ponto de equilíbrio instável associado à aceleração da máquina que apresenta, no instante $t = 0^+$, a maior razão entre a aceleração inicial e a inércia da mesma.

x_i, i=1,2,... u.e.p.s na fronteira de estabilidade $\partial A(x_s)$, de um a.s.e.p. x_s. Então:

$$\partial A(x_s) = \bigcup_{x_i \in E \cap \partial A} W^s(x_i). \tag{2.5}$$

Neste mesmo trabalho [11], os autores também estenderam a caracterização anterior, produzindo o seguinte corolário do teorema anterior:

Corolário 2.4.1 (Caracterização simplificada da fronteira de estabilidade [11])**.** *Para um sistema dinâmico autônomo, na forma de (2.1), satisfazendo as hipóteses (2.A1)-(2.A4), sejam x_i^1, i=1,2,... u.e.p.s de tipo 1 na fronteira de estabilidade $\partial A(x_s)$, de um a.s.e.p. x_s. Então:*

$$\partial A(x_s) = \bigcup_{x_i^1 \in E \cap \partial A} \overline{W^s}(x_i^1). \tag{2.6}$$

Através da caracterização da fronteira de estabilidade anterior, é possível não somente determinar o *closest u.e.p.*, mas também provar sua existência e unicidade. Tais fatos foram demonstrados em detalhes no trabalho de Chiang e Thorp [15], através do uso de um sistema reduzido, em 1989.

Deste modo, o método *closest u.e.p.* pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. Calcule todos os u.e.p.s de tipo 1 de (2.1);

2. Ordene os pontos de equilíbrio de tipo 1, calculados no passo anterior, em ordem crescente de energia;

3. Verifique um a um, na ordem estabelecida no passo anterior, se o u.e.p. calculado está na fronteira de estabilidade $\partial A(x(s))$, checando o teorema (2.4.4), através da integração do sistema (2.1), tomando como condição inicial um ponto ε-próximo do u.e.p. sob análise, na direção do autovetor associado ao autovalor instável deste, e verificando se $W^u(x_u)$ converge para o a.s.e.p.;

4. Defina o valor da energia crítica L como sendo o valor da função energia no *closest unstable equilibrium point*: $L = V(x_{closest})$;

5. Calcule o valor da função energia no tempo de eliminação da falta (v_f) utilizando a trajetória do sistema em falta;

6. Se $v_f < L$ então o sistema permanece estável no pós-falta, caso contrário, o mesmo pode tornar-se instável.

Nos trabalhos de Chiang et al [11], [15], podem ser encontrados algoritmos melhorados para o *Closest Unstable Equilibrium Point*. Em [15], através do uso de um sistema

reduzido, o esforço computacional para a determinação dos u.e.p.s na fronteira de estabilidade é significativamente reduzido, e em [11], um método refinado para a verificação do teorema (2.4.4) é proposto, porém tais melhorias não são capazes de diminuir o conservadorismo das estimativas deste método, uma vez que o mesmo não considera a direção da trajetória do sistema em falta.

Baseados nos resultados demonstrados nos trabalhos de Chiang, Wu e Varaiya [11], [13] não é difícil verificar que, sendo L o valor da função energia no *closest u.e.p.* e tomando a componente conexa S_L do conjunto Ω_L que contém o a.s.e.p. x_s, a trajetória do sistema em falta cruza a fronteira de S_L antes de cruzar a fronteira de estabilidade $\partial A(x_s)$, do a.s.e.p. x_s do sistema pós-falta. Dessa forma, em 1989, Chiang [14] enunciou o seguinte teorema:

Teorema 2.4.6 (Conservadorismo do método "Closest Unstable Equilibrium Point" [14], [15])**.** *Seja V uma função energia para o sistema (2.1). Seja x_u um u.e.p. sobre a fronteira de estabilidade de um a.s.e.p. x_s, $\partial A(x_s)$. Seja $V_c(x_u)$ a componente conexa do conjunto $\{x \in \mathbb{R}^n \, V(x) < V(x_u)\}$ contendo x_s e seja $\partial V_c(x_u)$ a fronteira desta componente. Então, tem-se que $\partial V_c(x_u)$ intercepta a variedade estável de $W^s(x_u)$ somente no ponto x_u, e além disso o conjunto $V_c(x_u)$ tem intersecção nula com $W^s(x_u)$.*

O teorema (2.4.6) diz que toda trajetória do sistema (2.1), iniciando dentro do conjunto $V_c(x_u)$, deve cruzar a fronteira deste antes de atravessar a variedade estável de x_u, que está contida na fronteira da região de estabilidade de x_s conforme a caracterização dada em (2.5).

Desta maneira, o fato da direção da trajetória do sistema em falta não ser levada em consideração, torna a estimativa do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ excessivamente conservadora, em muitos casos, ao considerar o ponto de menor energia na fronteira de estabilidade $\partial A(x_s)$, uma vez que a trajetória em falta pode atingir a mesma em um ponto de energia muito maior que o encontrado pelo método proposto, conforme mostrado na figura (2.4).

Métodos para diminuir tal conservadorismo foram amplamente estudados e relatados na literatura desde a década de 70 [5], [30]. Entre estes o método "Controlling Unstable Equilibrium Point" (em português Ponto de Equilíbrio Instável de Controle) [11], [14] tem sido aceito como o melhor método direto para a estimação do t_{cr} em estudos de estabilidade transitória e será estudado na próxima seção.

2.4.2 O Método "Controlling Unstable Equilibrium Point"

Com o intuito de tornar relevante as informações fornecidas pela trajetória do sistema em falta na determinação correta do valor crítico L e encontrar uma forma de evitar o cálculo de todos os u.e.p.s na obtenção do mesmo, surgiu na literatura um método conhecido como *Controlling Unstable Equilibrium Point*, que propõe o uso de um ponto de equilíbrio

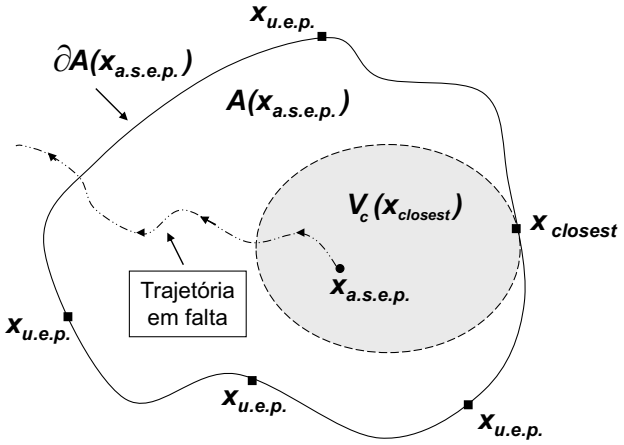

Figura 2.4: Método *Closest u.e.p.*.

instável, localizado na fronteira da região de estabilidade do a.s.e.p. x_s, $\partial A(x_s)$, com a energia mais próxima do ponto na qual a trajetória em falta abandona a região de estabilidade $A(x_s)$ como referência para a determinação do valor crítico L.

Tal método consiste basicamente nas seguintes etapas conceituais [14]:

1. Determine o ponto de equilíbrio instável de controle (c.u.e.p. - do inglês *controlling unstable equilibrium point*) para a trajetória do sistema em falta;

2. Defina o valor da energia crítica L como sendo o valor da função energia no c.u.e.p.: $L = V(x_{cuep})$;

3. Calcule o valor da função energia no instante de eliminação da falta (v_f) utilizando a trajetória do sistema em falta;

4. Se $v_f < L$ então o sistema permanece estável no pós-falta, caso contrário, o mesmo pode tornar-se instável.

A figura (2.5) ilustra a estimativa da fronteira da região de estabilidade obtida através do uso do método do ponto de equilíbrio instável de controle em comparação com a estimativa fornecido pelo método *closest u.e.p.*.

Atualmente, este é o método direto mais aceito quanto a sua aplicabilidade à análise de estabilidade transitória de SEPs. Porém ainda resta a questão fundamental sobre como encontrar o c.u.e.p..

Entre as dificuldades na obtenção do c.u.e.p. destacam-se [20]:

- (i) O c.u.e.p. é um ponto de equilíbrio particular imerso num espaço de estados de grande dimensão, dificultando a busca do mesmo;

- (ii) A verdadeira trajetória do sistema em falta é próxima porém diferente do resultado numérico obtido nas simulações, incorrendo em imprecisões na determinação do c.u.e.p..

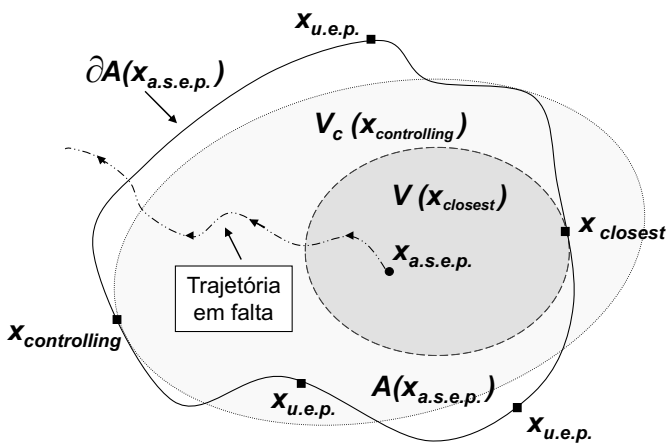

Figura 2.5: Método *Controlling u.e.p.*.

Muitos pesquisadores tentaram definir o c.u.e.p. de maneira a possibilitar sua determinação, porém sem sucesso em sua maioria [20], [21][22], uma vez que as estimativas resultantes de uma má definição do c.u.e.p. tornam-se muito conservadoras. Em 1987, Chiang, Wu e Varaiya [11] caracterizaram a fronteira da região de estabilidade de forma a tornar possível a correta definição do c.u.e.p., como sendo o u.e.p. cuja variedade estável é atingida pela trajetória do sistema em falta.

No próximo capítulo deste trabalho, a definição do c.u.e.p. proposta por Chiang, Wu e Varaiya [11] será discutida, e os métodos diretos PEBS e BCU serão estudados a fim de fornecer uma sistematização para o cálculo do mesmo.

[22]Em [20] e [21] pode-se encontrar um pequeno histórico sobre as diversas definições do c.u.e.p. propostas na literatura, bem como alguns comentários sobre o conservadorismo imposto pelas mesmas.

Capítulo 3

Análise de Estabilidade Transitória - Modelos Reduzidos

3.1 Introdução

Neste capítulo, uma revisão do método clássico de análise de estabilidade transitória será feita, com o objetivo de obter uma referência de comparação para os resultados obtidos através do uso de métodos diretos. Os métodos PEBS e BCU serão apresentados e discutidos quanto às suas principais vantagens e dificuldades de implementação na análise de estabilidade transitória utilizando modelos reduzidos de SEPs.

3.2 Modelagem para Análise Clássica de Estabilidade Transitória

O problema de estabilidade transitória pode ser compreendido em termos da determinação da capacidade de um SEP manter (ou restaurar) sua operação normal, dada a ocorrência e respectiva mitigação de uma contingência (falta). Em outras palavras, é a avaliação da capacidade do sistema em absorver a energia cinética, acrescida aos rotores dos geradores síncronos conectados ao SEP, proveniente da falta e manter o sincronismo entre as máquinas do sistema após a eliminação da mesma [35].

Na análise clássica de estabilidade transitória de SEPs, utilizando modelos reduzidos, algumas hipóteses são assumidas a fim de simplificar e tornar computacionalmente tratável a mesma. Entre as suposições mencionadas, apresentam-se as seguintes [7], [34], [53]:

- Hipótese relacionada ao sistema de transmissão:
    - Admite-se que o sistema de transmissão (rede) do SEP esteja em regime permanente senoidal, ou seja, as constantes de tempo da rede são desprezíveis quando comparadas à freqüência eletromecânica de oscilação das máquinas.

- Hipótese relacionada à carga:
  - As cargas conectadas ao sistema podem ser representadas por impedâncias constantes, calculadas a partir das condições de tensão do período anterior à ocorrência da perturbação (regime permanente pré-falta) obtidas de um fluxo de carga.
- Hipóteses relacionadas ao gerador síncrono:
  - A máquina síncrona pode ser representada por uma fonte de tensão de magnitude constante, determinada pelas condições em regime permanente existentes antes da falta, em série com uma reatância, comummente conhecida como reatância transitória de eixo direto (modelo clássico do gerador síncrono);
  - O ângulo de fase da tensão atrás da reatância transitória coincide com o ângulo elétrico do rotor em relação à referência síncrona girante δ;
  - Supõe-se que as potência mecânicas das máquinas permanecem constantes e iguais aos seus valores pré-falta durante todo o intervalo de tempo de interesse para o estudo (0 a 4s), ou seja, considera-se que os reguladores de velocidade sejam lentos o bastante para que a dinâmica dos mesmos possa ser desconsiderada nas análises.

A hipótese sobre o sistema de transmissão é feita a fim de tornar possível o tratamento do mesmo a partir da teoria de fasores. Desta forma, é possível descrever a rede do SEP através do uso da matriz admitância $\underline{Y}_{bus}$.

A suposição sobre a modelagem da carga do sistema, também é feita na intenção de possibilitar a descrição simplificada do sistema através de uma matriz admitância, que contenha não somente a topologia do SEP, mas também a descrição das cargas do mesmo. Uma breve discussão sobre o conservadorismo imposto pela adoção destas hipóteses na análise de estabilidade transitória de SEPs é feita por Anderson e Fouad [4], cuja leitura é deixada como recomendação ao leitor interessado.

Com as hipóteses anteriores, pode-se modelar as máquinas síncronas conectadas ao SEP através de um modelo clássico, descrito através da seguinte equação diferencial [7], [34], [50], [53]:

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e \tag{3.1}$$

onde δ é o desvio angular da máquina com relação à referência síncrona, M é a constante de inércia do gerador, D representa um conjunto de amortecimentos, devido aos enrolamentos amortecedores dos geradores e cargas dependentes da freqüência conectas ao sistema, P_m e P_e são as respectivas potências mecânica e elétrica da máquina.

A equação (3.1) é conhecida na literatura como "equação do *swing*[1]" ou "equação de oscilação", de forma que uma máquina está girando à velocidade síncrona sempre que $P_m = P_e$, ou seja, o desvio de freqüência angular é nulo ($\dot{\delta} = 0$).

O problema de estabilidade transitória possui uma peculiaridade quanto à sua modelagem no tempo fazendo com que o estudo possa ser caracterizado em três intervalos bem definidos quanto à ocorrência e respectiva eliminação da falta:

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} \;=\; P_m - P_e \quad \left\{ \begin{array}{ll} t \leq 0, & P_e = P_e^{prf} \\ 0 \leq t \leq t_{ab}, & P_e = P_e^{f} \\ t \geq t_{ab}, & P_e = P_e^{pf} \end{array} \right\} \tag{3.2}$$

onde o índice "prf" refere-se ao período pré-falta, "f" ao período em falta e "pf" ao período pós-falta.

A modelagem (3.2) é fruto de uma alteração topológica da rede de transmissão após a ocorrência de uma falta alterando assim a potência elétrica P_e fornecida pelos geradores conectados ao SEP.

Neste trabalho, todas as contingências aplicadas sobre o SEP serão curtos-circuitos trifásicos permanentes e francos[2] à terra, tendo como resultado uma alteração topológica da rede de transmissão, uma vez que a atuação do sistema de proteção irá isolar o equipamento sob defeito.

Outra consideração utilizada nas análises foi o fato de que todas as perdas mecânicas devidas ao conjunto turbina-gerador foram desprezadas, ou seja, no período pré-falta admite-se que $P_m = P_e^{prf}$.

Uma vez descrito o problema, a abordagem clássica prevê a realização de uma série de simulações do SEP, com o intuito de determinar o tempo crítico de abertura t_{cr} para uma dada contingência do sistema.

Assim, seja o SEP constituído por **n** geradores, por **n+m** cargas e pela rede de transmissão. Sendo o sistema de transmissão composto por **n+m** barras (nós elétricos), este pode ser descrito pela matriz admitância $\underline{Y}_{bus}$ [58]:

$$\underline{Y}_{bus} = \left[\begin{array}{cc} [\underline{Y}_1]_{(n\times n)} & [\underline{Y}_2]_{(n\times m)} \\ [\underline{Y}_3]_{(m\times n)} & [\underline{Y}_4]_{(m\times m)} \end{array} \right] \tag{3.3}$$

Considerando que os geradores estão conectados aos n primeiros nós da rede através de suas reatância transitórias de eixo direto, e as cargas estão distribuídas ao longo de toda a rede, conforme mostrado na figura (3.1), pode-se montar a matriz admitância global $\underline{\tilde{Y}}_{bus}$

[1] O termo *"swing"* é utilizado na literatura para designar o ciclo de aceleração/desaceleração dos geradores síncronos durante a ocorrência de uma contingência.

[2] Uma falta é dita "franca" se a impedância entre os pontos onde a mesma ocorre é nula ($Z_{falta} = 0$).

[7], [53]:

$$\underline{\tilde{Y}}_{bus} = \begin{bmatrix} [\underline{Y}]_{(n\times n)} & -[\underline{Y}]_{(n\times n)} & [\underline{0}]_{(n\times m)} \\ -[\underline{Y}]_{(n\times n)} & [\underline{Y}_1]_{(n\times n)} + [\underline{Y}]_{(n\times n)} + [\underline{Y}_{lg}]_{(n\times n)} & [\underline{Y}_2]_{(n\times m)} \\ [\underline{0}]_{(m\times n)} & [\underline{Y}_3]_{(m\times n)} & [\underline{Y}_4]_{(m\times m)} + [\underline{Y}_{ll}]_{(m\times m)} \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

onde $\underline{Y}$ é uma matriz diagonal formada pelas reatâncias transitórias de eixo direto das máquinas, $\underline{Y}_{lg}$ e $\underline{Y}_{ll}$ são matrizes diagonais formadas pelas cargas conectadas às n barras de geração e às m barras de carga restantes do sistema, respectivamente.

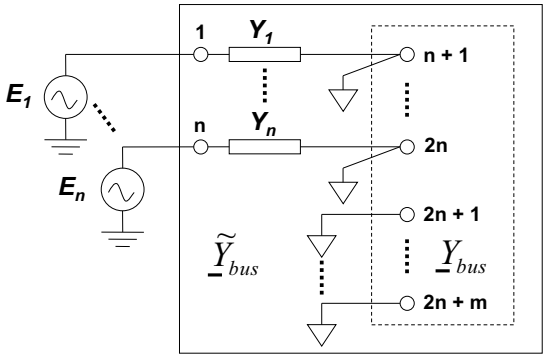

Figura 3.1: Configuração usual para análise de estabilidade transitória de SEPs.

Uma observação deve ser feita quanto a modelagem das cargas como impedâncias constantes, pois desta forma as mesmas podem ser incluídas nos elementos da matriz admitância global, fazendo com que a injeção de corrente se torne nula em todas as barras de carga do SEP, exceção feita às barras de geração.

Desta maneira podemos particionar a matriz admitância global $\underline{\tilde{Y}}_{bus}$ da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} [\underline{I}_g]_{(n\times 1)} \\ [\underline{0}]_{[(n+m)\times 1]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{Y}_A]_{(n\times n)} & [\underline{Y}_B]_{[n\times(n+m)]} \\ [\underline{Y}_C]_{[(n+m)\times n]} & [\underline{Y}_D]_{[(n+m)\times(n+m)]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\underline{E}_g]_{(n\times 1)} \\ [\underline{E}_l]_{[(n+m)\times 1]} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

onde I_g é um vetor composto pelas injeções de correntes nas barras de geração do SEP, E_g e E_l são vetores compostos pelas tensões complexas nas barras de geração e de carga do sistema, respectivamente.

Da equação (3.5) obtém-se facilmente o seguinte resultado:

$$\underline{I}_g = (\underline{Y}_A - \underline{Y}_B\ \underline{Y}_D^{-1}\ \underline{Y}_C)\ \underline{E}_g \tag{3.6}$$

Deste modo, uma vez tendo determinado o vetor de injeções de corrente nas barras de geração, em função das componentes da matriz admitância $\underline{\tilde{Y}}_{bus}$, é possível determinar a potência elétrica das máquinas $\underline{P}_e$, em função das correntes $\underline{I}_g$, e desta maneira resolver (3.2). Porém o cálculo da matriz inversa $\underline{Y}_D^{-1}$ pode se tornar computacionalmente

proibitivo para sistemas de grande porte.

Desse modo, uma saída para o problema anterior é reduzir a rede de transmissão aos nós internos das forças eletromotrizes (f.e.m.s) das máquinas de forma a evitar o cálculo de matrizes inversas. Tal procedimento de redução pode ser realizado por um simples escalonamento (eliminação de Gauss [9]) da matriz $\underline{\tilde{Y}}_{bus}$, obtendo assim a matriz reduzida $\underline{Y}_{red}$.

Desta forma,utilizando a matriz reduzida $\underline{Y}_{red}$, pode-se obter a expressão para a potência elétrica dos geradores P_{ei}, da seguinte forma:

$$P_{ei} = \Re[E_{gi}\ I_{gi}^*], \quad i = 1, 2, \ldots n \tag{3.7}$$

onde $\Re[\cdot]$ designa a parte real do argumento e $(\cdot)^*$ indica o conjugado complexo da variável.

Sendo $E_{gi} = |E_i|\angle\delta_i$ a f.e.m. do gerador i e $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$, o elemento ij da matriz $\underline{Y}_{red}$, obtém-se:

$$P_{ei} = \Re[E_{gi} \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}^*\ E_{gj}^*], \quad i = 1, 2, \ldots n \tag{3.8}$$

Desenvolvendo a expressão (3.8) e definindo $D_{ij} = |E_i|\ |E_j|\ |Y_{ij}|\ cos(\phi_{ij})$ e $C_{ij} = |E_i|\ |E_j|\ |Y_{ij}|\ sen(\phi_{ij})$, obtém-se [7]:

$$P_{ei} = |E_i|^2\ G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{n} [C_{ij} sen(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} cos(\delta_i - \delta_j)], \quad i = 1, 2, \ldots n \tag{3.9}$$

Uma vez tendo derivado a expressão para P_{ei}, pode-se prosseguir a resolução do sistema (3.2) para as diversas máquinas do SEP.

Neste ponto é importante fazer menção às mudanças realizadas no cálculo da matriz admitância reduzida $\underline{Y}_{red}$, no momento da ocorrência de um defeito (falta) e no momento de sua respectiva eliminação. Neste trabalho a análise de segurança dinâmica será realizada de acordo com o critério (N-1)[3], considerando que todas as faltas ocorram num local suficientemente próximo a uma barra do SEP, de forma que a análise possa ser realizada assumindo que as mesmas estejam sobre a própria barra [7].

Nas condições anteriormente expostas, o cálculo da matriz $\underline{Y}_{red}$ no período em que o SEP está sob falta, ou seja sob a ocorrência de uma perturbação (defeito), é feito eliminando-se da matriz $\underline{Y}_{bus}$ a barra sob falta. Já no período pós-falta, a barra sob falta

[3]O critério (N-1) pressupõe que o SEP deva permanecer ou atingir um estado de operação normal e seguro quando da perda de um único equipamento, em relação à sua configuração inicial (caso base de estudo), do sistema.

retorna à matriz $\underline{Y}_{bus}$ e o equipamento sob falta é eliminado da mesma.

Com isso, verifica-se para uma dada falta e um dado tempo de atuação do sistema de proteção t_{ab} se as máquinas irão ou não permanecer oscilando juntas, ou seja, em sincronismo.

Nota-se então que a análise de estabilidade transitória em sistemas multimáquinas se reduz a uma análise de sincronismo entre os geradores, uma vez que se os mesmos se mantiverem oscilando conjuntamente por tempo suficiente para que os controladores mecânicos do SEP atuem, o sistema conseguirá retornar a um estado de operação normal, de forma a caracterizar a estabilidade do mesmo. Alberto e Bretas [1] mostraram a equivalência entre estes dois estudos em 1998.

Na análise clássica, a obtenção de uma estimativa para o tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ é realizada a partir da resolução do problema de estabilidade transitória, para um determinado t_{ab}, e da posterior verificação do sincronismo entre as máquinas num processo iterativo de aproximação como anteriormente descrito na seção (2.2) deste trabalho.

Na próxima seção é realizada a análise clássica de estabilidade transitória em um SEP equivalente reduzido[4] da região sul brasileira a fim de obter resultados para uma posterior comparação com os que serão obtidos por meio da aplicação de métodos diretos.

3.2.1 Exemplo: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido

Nesta seção, a análise clássica de estabilidade transitória, descrita na seção (3.2) deste trabalho, será aplicada ao sistema sul brasileiro equivalente reduzido, composto por 45 barras, 10 geradores, 40 linhas de transmissão e 17 transformadores, a fim de obter uma referência para comparação com os métodos diretos estudados nas próximas seções deste trabalho.

A figura (3.2) mostra o sistema sul brasileiro equivalente reduzido, utilizado como objeto de estudo na análise de segurança dinâmica proposta neste trabalho. Os dados estáticos e dinâmicos que descrevem o modelo reduzido deste SEP estão fornecidos no apêndice A deste trabalho.

A análise de estabilidade transitória realizada considera o critério (N-1) para a perda de equipamentos do SEP. Neste trabalho os equipamentos a serem expostos às contingências serão as linhas de transmissão e os transformadores do sistema, uma vez que estes são os elementos mais freqüentemente afetados por contingências, resultando numa lista de contingências com um total de 114 casos.

Os resultados do estudo de estabilidade transitória para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido, estão mostrados na tabela (3.1):

[4] O termo "SEP equivalente reduzido" aqui utilizado se refere ao fato de que, sendo o sistema elétrico brasileiro é um sistema interligado e composto por aproximadamente 4000 barras [29], o sistema sul apresentado neste trabalho como exemplo para as aplicações propostas possui uma série de equivalentes estáticos e dinâmicos em sua modelagem.

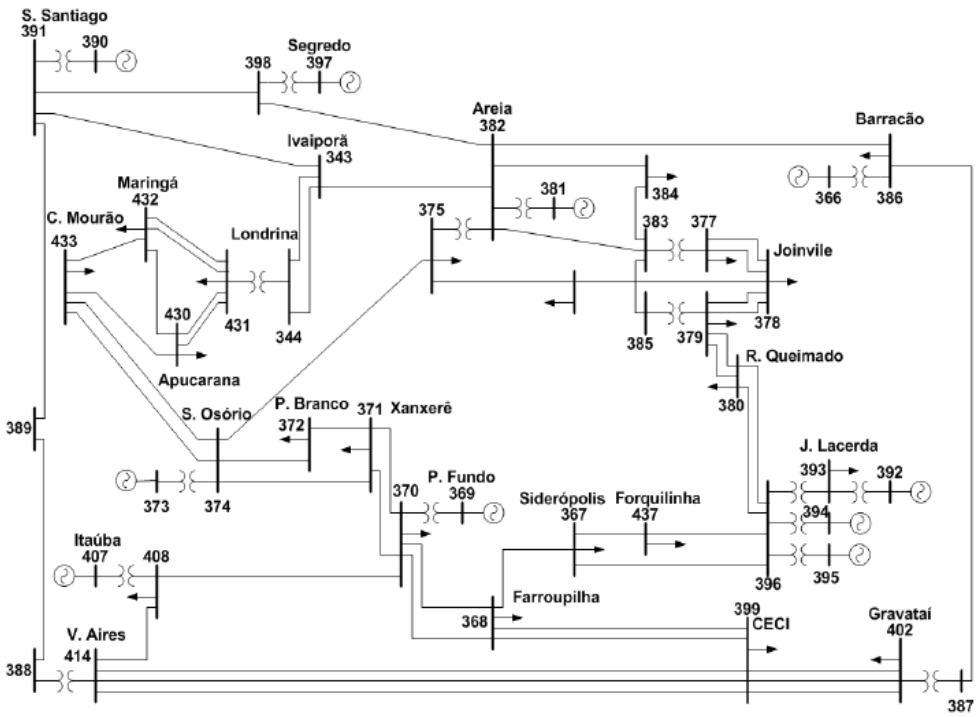

Figura 3.2: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido.

Tabela 3.1: Estimativas do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido (análise clássica).

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (s)
343 - 344	343	>1.0[5]
343 - 344	344	>1.0
343 - 382	343	>1.0
343 - 382	382	0.390
343 - 391	343	>1.0
343 - 391	391	0.366
344 - 431	344	>1.0
344 - 431	431	>1.0
366 - 386	—	ilhamento[6]
367 - 368	367	0.402
367 - 368	368	>1.0
367 - 396	367	0.403
367 - 396	396	0.246
367 - 437	367	0.409

[5]Caso em que o SEP se apresenta robusto a contingência sob estudo, uma vez que as máquinas permanecem em sincronismo para tempos de abertura de até 1s, (tempo muito superior ao tempo real de atuação do sistema de proteção que é da ordem de 100ms).

[6]Caso onde ocorre a separação (divisão) física da rede de transmissão do SEP pós-falta.

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (s)
367 - 437	437	0.454
368 - 370	368	>1.0
368 - 370	370	0.346
368 - 399	368	>1.0
368 - 399	399	>1.0
369 - 370	—	ilhamento
370 - 371	370	0.307
370 - 371	371	>1.0
370 - 408	370	0.323
370 - 408	408	0.207
371 - 372	371	>1.0
371 - 372	372	>1.0
371 - 374	371	>1.0
371 - 374	374	0.187
372 - 374	372	>1.0
372 - 374	374	0.187
373 - 374	—	ilhamento
374 - 375	374	0.158
374 - 375	375	>1.0
374 - 433	374	0.157
374 - 433	433	>1.0
375 - 376	375	>1.0
375 - 376	376	>1.0
375 - 382	375	>1.0
375 - 382	382	0.345
376 - 377	376	>1.0
376 - 377	377	>1.0
377 - 378	377	>1.0
377 - 378	378	>1.0
377 - 383	377	>1.0
377 - 383	383	>1.0
378 - 379	378	>1.0
378 - 379	379	>1.0
379 - 380	379	>1.0
379 - 380	380	0.399
379 - 385	379	>1.0
379 - 385	385	>1.0

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (s)
380 - 396	380	0.378
380 - 396	396	0.170
381 - 382	—	ilhamento
382 - 383	382	0.401
382 - 383	383	>1.0
382 - 384	382	0.402
382 - 384	384	>1.0
382 - 386	382	0.367
382 - 386	386	0.393
382 - 398	382	0.397
382 - 398	398	0.334
383 - 384	383	>1.0
383 - 384	384	>1.0
383 - 385	383	>1.0
383 - 385	385	>1.0
386 - 387	386	0.548
386 - 387	387	>1.0
387 - 402	387	>1.0
387 - 402	402	>1.0
388 - 389	388	>1.0
388 - 389	389	>1.0
388 - 414	388	>1.0
388 - 414	414	>1.0
389 - 391	389	>1.0
389 - 391	391	0.356
390 - 391	—	ilhamento
391 - 398	391	0.289
391 - 398	398	0.376
392 - 393	—	ilhamento
393 - 396	—	ilhamento
394 - 396	—	ilhamento
395 - 396	—	ilhamento
396 - 437	396	0.249
396 - 437	437	0.452
397 - 398	—	ilhamento
399 - 402	399	>1.0
399 - 402	402	>1.0

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (s)
399 - 414	399	>1.0
399 - 414	414	>1.0
407 - 408	—	ilhamento
408 - 414	408	0.186
408 - 414	414	>1.0
430 - 431	430	>1.0
430 - 431	431	>1.0
430 - 432	430	>1.0
430 - 432	432	>1.0
430 - 433	430	>1.0
430 - 433	433	>1.0
431 - 432	431	>1.0
431 - 432	432	>1.0
432 - 433	432	>1.0
432 - 433	433	>1.0

Analisando os dados fornecido na tabela (3.1), verificam-se em diversos casos a não obtenção de uma estimativa para o tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$. Tais casos de indeterminação resultam da ocorrência de uma dentre duas possíveis condições:

1. Ilhamento do SEP, ou seja, separação (divisão) física do sistema em duas áreas distintas (disjuntas). Neste trabalho este tipo de ocorrência será considerada crítica no sentido de afetar o compartilhamento da demanda do sistema entre os diversos geradores conectados ao mesmo e reduzir as margens de segurança (estabilidade) do SEP;

2. Robustez do SEP frente a uma determinada contingência, em outras palavras, podem existir contingências amenas que mesmo presentes por um longo intervalo de tempo (0 a 4s) não conduzem o sistema à instabilidade, ou seja, não provocam a perda de sincronismo entre os geradores conectados ao sistema. Embora não seja o escopo deste trabalho, uma observação importante é o fato de que, devido à redução da rede aos nós internos das f.e.m.s das máquinas, o problema de instabilidade de tensão nas barras do sistema não pode ser observado, desta maneira, um SEP robusto a uma contingência no contexto TSA pode não o ser no contexto VSA.

É importante ressaltar, neste momento, que uma nova metodologia para a identificação de ilhamento no SEP foi utilizada para determinar este tipo de ocorrência no caso sob estudo. Tal metodologia será exposta em detalhes no próximo capítulo deste trabalho.

Também é necessário fazer menção ao fato de que nem sempre a ocorrência de um

ilhamento[7] no SEP conduz o mesmo à instabilidade, uma vez que a perda de uma geração pode ser compensada pelo redespacho da geração das demais unidades conectadas ao sistema, e mesmo no caso da divisão do sistema em áreas isoladas, existe a possibilidade de que as gerações isoladas sejam suficientes para alimentar as demandas destas áreas[8]. Porém, tais análises não serão contempladas neste trabalho.

Na próxima seção o método direto PEBS será estudado a fim de ser aplicado à análise de estabilidade transitória de SEPs, utilizando modelos reduzidos. Suas principais vantagens e desvantagens serão apresentadas e discutidas frente a análise clássica, anteriormente apresentada.

3.3 O método direto PEBS

O método PEBS (do inglês *Potential Energy Boundary Surface*), proposto inicialmente por Kakimoto, Oshawa e Hayashi em 1978 [30] e mais tarde estendido por Athay, Podmore e Virmani [5], utiliza uma aproximação da fronteira da região de estabilidade, obtida através do uso de uma função energia avaliada sobre a trajetória do sistema em falta.

Inicialmente o método PEBS foi proposto em bases heurísticas, como uma maneira de evitar o cálculo do ponto de equilíbrio instável de controle e diminuir o esforço computacional requerido nas análises de estabilidade transitória. Porém, tal fato faz com que este método direto possa oferecer tanto estimativas conservadoras como não conservadoras [13], como será discutido a seguir neste trabalho.

Primeiramente, considere uma máquina síncrona conectada, através de uma linha de transmissão sem perdas resistivas, a um barramento infinito, onde o mesmo pode ser modelado como uma máquina de altíssima inércia e grande capacidade de geração ou absorção de potência. Com isso, pode-se modelar tal sistema através do seguinte conjunto de equações diferenciais:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ M\dot{\omega} &= P_m - \frac{|E|\,|E_\infty|}{X} sen(\delta - \delta_\infty) - D\omega \end{aligned} \tag{3.10}$$

onde δ e ω são os desvios de ângulo e de freqüência da máquina em relação à referência síncrona estabelecida pelo barramento infinito, assim deve-se ressaltar que $\delta_\infty = 0rad$ uma vez que o desvio angular entre o barramento infinito e a referência síncrona é nulo, M é a constante de inércia do gerador, D representa um conjunto de amortecimentos, devido

[7] A detecção deste tipo de ocorrência foi realizada, neste trabalho, através da fatoração e respectiva análise da matriz incidência (barra-ramo) do SEP. Tal processo de identificação será discutido em detalhes no próximo capítulo deste trabalho.

[8] O manual de procedimentos da operação do Operador Nacional do Sistema (ONS) brasileiro prevê que em casos de ilhamento de geradores, os geradores ilhados passem do modo de operação de potência constante para o modo de operação à freqüência constante a fim de alimentar as cargas de suas respectivas áreas (Procedimentos de Rede do ONS - módulo 10).

aos enrolamentos amortecedores do gerador, P_m é a potência mecânica da máquina, E e $E_\infty = 1p.u.$ são as f.e.m.s da máquina e do barramento infinito respectivamente, e X é a reatância da linha de transmissão associada em série com as reatâncias transitórias de eixo direto das máquinas.

Os pontos de equilíbrio do sistema (3.10) são dados pela seguinte expressão:

$$\delta = sen^{-1}\left(\frac{P_m X}{|E|\ |E_\infty|}\right), \quad \dot{\delta} = 0 \tag{3.11}$$

Existem, ao menos, três pontos de equilíbrio dentro do conjunto $K = \{(\delta, \omega) : -\frac{3\pi}{2} < \delta < \frac{3\pi}{2},\ \dot{\delta} = 0\}$[9], onde $(\delta_1, 0) = (\delta_s, 0)$ é um a.s.e.p., $(\delta_2, 0) = (\pi - \delta_s, 0)$ e $(\delta_3, 0) = (-\pi - \delta_s, 0)$ são u.e.p.s.

Considere a seguinte função energia para o sistema (3.10) dada por [7], [13]:

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2}M\omega^2 - P_m(\delta - \delta_s) - \frac{|E|\ |E_\infty|}{X}(cos(\delta) - cos(\delta_s)) \tag{3.12}$$

onde δ_s indica o ângulo do ponto de equilíbrio assintóticamente estável do sistema pós-falta.

A função energia anterior pode ser claramente decomposta em duas componentes: $V(\delta, \omega) = V_k(\omega) + V_p(\delta)$, onde $V_k(\omega)$ e $V_p(\delta)$ representam as componentes cinética e potencial da energia, respectivamente.

Desta forma, para o sistema máquina versus barramento infinito, dado um amortecimento D suficientemente grande [47], podem-se observar os seguintes fatos [13], [21]:

- A intersecção entre a região de estabilidade do ponto $(\delta_s, 0)$ e o conjunto K, anteriormente definido, é $P = \{(\delta, \dot{\delta}) : \dot{\delta} = 0,\ \delta_3 < \delta < \delta_2\}$, como mostrado na figura (3.3.a);

- A fronteira do conjunto P no espaço dos ângulos δ, consiste de dois pontos δ_2 e δ_3;

- Os pontos $(\delta_2, 0)$ e $(\delta_3, 0)$ são caracterizados como pontos de máximo da energia potencial $V_p(\delta)$, conforme a figura (3.3.b).

Com base nas observações anteriores, sugere-se que toda trajetória do sistema (3.10) em falta deve atingir um ponto de máximo da energia potencial na fronteira da região de estabilidade de $(\delta_s, 0)$, assim $V_p(\delta)$ poderia ser utilizado para detectar este cruzamento dando origem à chamada superfície de fronteira da energia potencial. A extensão destas idéias para sistemas multimáquinas não é uma tarefa trivial, uma vez que com o aumento da dimensão do espaço dos ângulos δ, a fronteira de estabilidade não pode ser facilmente determinada, nem as observações anteriores constatadas.

[9]Deve-se observar que existem múltiplas soluções de equilíbrio na forma (3.11) para o sistema (3.10), dado a característica periódica deste sistema. Assim, o intervalo $(-\frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ foi definido de modo para garantir que este contivesse os pontos de equilíbrio de interesse para a análise desejada.

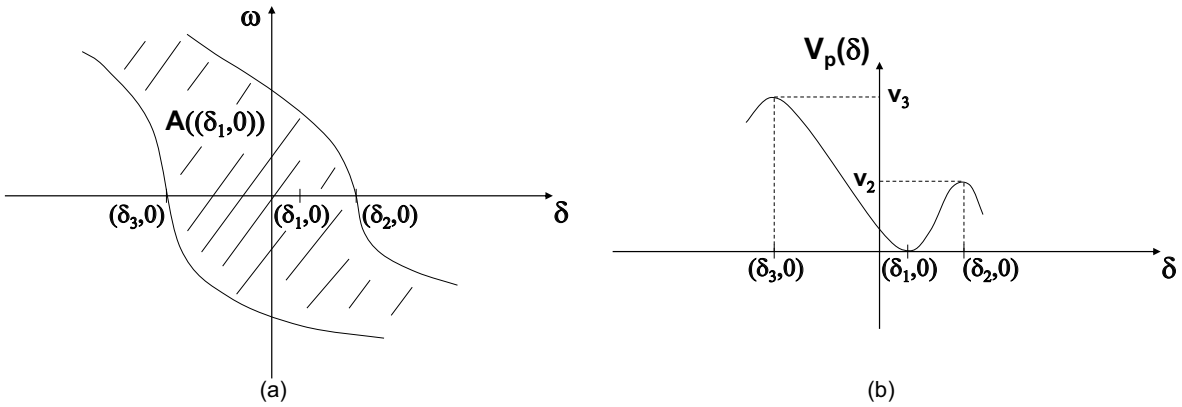

Figura 3.3: (a) Região de estabilidade do sistema máquina versus barramento infinito e (b) componente potencial da função energia $V_p(\delta)$ do sistema máquina versus barramento infinito.

Kakimoto, Oshawa e Hayashi [30] propuseram a primeira versão conhecida na literatura do método PEBS, na qual, dada a existência de uma função energia na forma $V(\underline{\delta}, \underline{\omega}) = V_k(\underline{\omega}) + V_p(\underline{\delta})$, utiliza-se o primeiro máximo da energia potencial, na direção da trajetória em falta, v_{max}, como uma aproximação para a fronteira da região de estabilidade do a.s.e.p., $\underline{\delta}_s^{pf}$, do sistema pós-falta, sendo então o conjunto dado por $\{(\underline{\delta}, \dot{\underline{\delta}}) : V(\underline{\delta}, \dot{\underline{\delta}}) < v_{max}\}$ uma aproximação da região de estabilidade do mesmo.

Desde modo, Kakimoto, Oshawa e Hayashi definiram o PEBS como a superfície que une os pontos de máxima energia potencial ao redor de $\underline{\delta}_s^{pf}$, passando ao longo da borda da superfície de energia potencial que contém em seu interior o ponto $V_p(\underline{\delta}_s^{pf})$, sendo portanto, ortogonal às superfícies equipotenciais de $V_p(\cdot)$.

Mais tarde, em 1979, Athay, Podmore e Virmani [5] estenderam a definição do PEBS, de modo a formá-lo pela união dos pontos de máximo de $V_p(\cdot)$, tomados sobre "todas" as direções a partir de $\underline{\delta}_s^{pf}$.

O método PEBS, proposto na literatura [30], [5] pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. Determine o ponto onde a trajetória do sistema em falta cruza o PEBS, encontrando o primeiro máximo da energia potencial, v_{max}, ao longo desta trajetória;

2. Utilize o conjunto $\{(\underline{\delta}, \dot{\underline{\delta}}) : V(\underline{\delta}, \dot{\underline{\delta}}) < v_{max}\}$ como uma estimativa da região de estabilidade de $\underline{\delta}_s^{pf}$ e conclua sobre a estabilidade transitória do sistema pós-falta.

Uma aplicação imediata do método PEBS é na determinação de uma estimativa para o tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$, uma vez que determinado o máximo da energia potencial, no ponto de cruzamento do PEBS $V_p(\delta^*)$, avalia-se a função energia $V(\underline{\delta}, \dot{\underline{\delta}})$ ao longo da trajetória em falta e verifica-se o instante de tempo $\hat{t}_{cr}$, onde $V(\underline{\delta}(\hat{t}_{cr}), \dot{\underline{\delta}}(\hat{t}_{cr})) = V_p(\underline{\delta}^*)$.

Espera-se que eliminando a contingência do SEP, antes do instante $\hat{t}_{cr}$, toda a energia armazenada no sistema, durante o período em falta, seja dissipada antes que a trajetória do sistema em falta abandone a região de estabilidade do a.s.e.p. do sistema pós-falta.

Porém, o PEBS possui algumas desvantagens, em sua maioria derivadas do emprego de heurísticas nas quais o método se baseia, que acabam por limitar o seu uso, tais como:

- Não se pode constatar, no caso multimáquinas, que o PEBS é a intersecção da fronteira de estabilidade com o subespaço $\{(\underline{\delta}, \underline{\dot{\delta}}) : \underline{\dot{\delta}} = 0)\}$, fazendo com que sua definição se torne imprecisa;

- O método PEBS pode fornecer estimativas não conservadoras, uma vez que o ponto de máxima energia potencial $V_p(\underline{\delta})$, na maioria dos casos não é um mínimo da função energia $V(\underline{\delta}, \underline{\omega})$, ou seja um u.e.p., sobre a fronteira da região de estabilidade. Deste modo, mesmo que a falta seja eliminada antes do $\hat{t}_{cr}$, determinado pelo método, o sistema pode abandonar a região de estabilidade por um ponto de energia potencial menor que o previsto, tornando o SEP instável no período pós-falta como apresentado na figura (3.4).

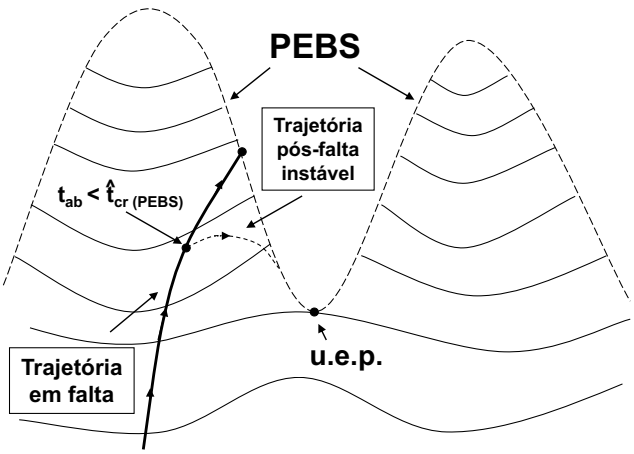

Figura 3.4: Falha no método PEBS.

Chiang, Wu e Varaiya [13], em 1988, forneceram as bases teóricas do PEBS, utilizando um sistema gradiente reduzido e provando a equivalência entre a a fronteira de estabilidade deste e do modelo clássico[10] que descreve o SEP, sob as hipóteses (2.A1)-(2.A4) e considerando as condutâncias de transferência nulas. Dessa forma o PEBS descreve com exatidão a fronteira da região de estabilidade de um sistema gradiente reduzido, dada a existência de uma função energia $V(\delta, \omega) = V_k(\omega) + V_p(\delta)$.

É necessário, neste momento, fazer menção ao fato de que a equivalência anterior somente pode ser demonstrada se a hipótese (2.A3) por válida a um parâmetro, ou seja, a condição de transversalidade é satisfeita quando da variação de um parâmetro do sistema [47].

[10] A palavra "clássico" também será utilizada neste trabalho, para fazer referência a modelagem das cargas como impedâncias constantes e a modelagem dos geradores conectados ao SEP como fontes de tensão constantes atrás de uma reatância, comummente tomada como a reatância transitória de eixo direto em circuito aberto, para estudos de estabilidade transitória.

Seja, então, o modelo clássico do SEP, desprezando as condutâncias de transferência e tomando o nó "n" como referência[11], dado pelo seguinte conjunto de equações diferenciais:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i \\ M_i\dot{\omega}_i &= P_{mi} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} |E_i||E_j|B_{ij}sen(\delta_i - \delta_j) - D_i\omega_i \end{aligned} \tag{3.13}$$

onde $i = 1, 2, \ldots, n-1$ e n é o número de geradores conectados ao sistema.

Seja a função energia para o sistema (3.13) dada por [13], [20]:

$$\begin{aligned} V(\underline{\delta}, \underline{\omega}) &= \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} M_i\omega_i^2 - \sum_{i=1}^{n} P_{mi}(\delta_i - \delta_j^s) - \\ & \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} |E_i||E_j|B_{ij}[cos(\delta_i - \delta_j) - cos(\delta_i^s - \delta_j^s)] = V_k(\underline{\omega}) + V_p(\underline{\delta}) \end{aligned} \tag{3.14}$$

onde $\underline{\delta}^s$ representa o a.s.e.p. do sistema (3.13) no período pós-falta.

Deve-se ressaltar que a obtenção da função energia (3.14) foi realizada tomando uma máquina como referência [7], uma vez que o sistema original (3.13), descrito na referência síncrona, não possui um a.s.e.p., impossibilitando que qualquer informação sobre o sincronismo das máquinas fosse obtida nesta referência.

O sistema gradiente reduzido para um SEP, cujas condutâncias de transferência foram desprezadas, pode ser expresso na seguinte forma:

$$\dot{\delta}_i = -\frac{\partial V_p(\underline{\delta})}{\partial \delta_i} = P_{mi} - P_{ei} := f_i(\underline{\delta}) \quad i = 1, 2, \ldots n \tag{3.15}$$

O sistema (3.15) é denominado gradiente, pois sua obtenção resulta do gradiente da componente potencial da função energia (3.14), e reduzido, uma vez que a ordem e o número das equações diferenciais envolvidas é a metade do sistema original (3.13).

Chiang, Wu e Varaiya [13] mostraram a correspondência entre a caracterização das fronteiras de estabilidade dos sistemas (3.13) e (3.15) de forma a exibir a relação existente entre os pontos de equilíbrio destes dois sistemas e conseqüentemente entre suas fronteiras de estabilidade. Para tanto, o sistema gradiente reduzido (3.15) é suavemente modificado ao longo de três passos de forma a estabelecer suas relações com o sistema original (3.13):

$$\begin{aligned} \dot{\delta} = -\frac{\partial V_p(\delta)}{\partial \delta} \longleftrightarrow D\dot{\delta} = -\frac{\partial V_p(\delta)}{\partial \delta} \longleftrightarrow \varepsilon I\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = -\frac{\partial V_p(\delta)}{\partial \delta} \\ \longleftrightarrow \begin{array}{c} \dot{\delta} = \omega \\ M\dot{\omega} = -D\omega - \frac{\partial V_p(\delta)}{\partial \delta} \end{array} \end{aligned} \tag{3.16}$$

[11] Neste caso é admitido a existência de um barramento infinito no enésimo nó do sistema de transmissão do SEP, ou seja, $E_n = 1$ e $\delta_n = 0$, de modo a estabelecer o problema de sincronismo entre as máquinas conectadas ao sistema e possibilitar a utilização de uma função energia em seu estudo.

Os passos envolvidos nas demonstrações de Chiang, Wu e Varaiya, visam provar as seguintes relações de equivalência estáticas e dinâmicas: $\underline{\delta}$ é um ponto de equilíbrio estável (instável) de (3.15) se e somente se $(\underline{\delta}, \underline{0})$ é um ponto de equilíbrio estável (instável) de (3.13), $\underline{\delta}$ é ponto de equilíbrio tipo k de (3.15) se e somente se $(\underline{\delta}, \underline{0})$ é ponto de equilíbrio tipo k de (3.13), e $\underline{\delta}_u$ é um u.e.p. na fronteira de estabilidade de um a.s.e.p. $\underline{\delta}_s$ de (3.15) se e somente se $(\underline{\delta}_u, \underline{0})$ é um u.e.p. na fronteira de estabilidade de um a.s.e.p. $(\underline{\delta}_s, \underline{0})$ de (3.13).

Dito isto, baseado na caracterização da fronteira da região de estabilidade (2.5) anteriormente obtida [11], pôde-se derivar uma caracterização topológica para o PEBS na seguinte forma:

Teorema 3.3.1 (Caracterização Topológica do PEBS [13]). *Se o sistema (3.13) satisfaz as condições (2.A1)-(2.A4) e além disso o número de u.e.p.s localizados na fronteira da região de estabilidade de um determinado a.s.e.p. é finito, então existe um sistema gradiente reduzido, na forma de (3.15), tal que:*

$$PEBS = \bigcup_i W^s_{(gr)}(\delta_i) \tag{3.17}$$

onde δ_i são os u.e.p.s sobre o PEBS e (gr) faz referência ao sistema gradiente reduzido (3.15).

Assim, a caracterização (3.17) e o fato de que o ponto de máxima energia potencial, geralmente não é um mínimo da função energia, sugerem uma melhor aproximação da fronteira de estabilidade. Esta melhoria é baseada numa nova definição do chamado ponto de equilíbrio instável de controle, dando assim origem ao método BCU, que será discutido adiante neste trabalho.

Neste momento, é importante ressaltar que em SEPs multimáquinas reais, as condutâncias de transferência podem não ser suficientemente pequenas para que o sistema gradiente reduzido (3.15) descreva com exatidão a dinâmica do sistema original. E mesmo em casos onde tais condutâncias sejam pequenas o bastante para validar as análises, o processo de redução da rede aos terminais das f.e.m.s dos geradores pode fazer com que as cargas conectadas ao sistema, modeladas como impedâncias constantes, produzam (numericamente ao fim do processo de escalonamento) grandes condutâncias de transferência.

Desta maneira, é necessário recorrer ao uso de funções energia numéricas (aproximadas), uma vez que seja pelas características reais do SEP (grandes condutâncias) ou seja pelo próprio processo de redução da rede (modelagem das cargas como impedâncias constantes), a obtenção de uma função energia exata é impossibilitada ou os resultados obtidos pelo uso de uma função energia exata são comprometidos.

Dito isto, a partir de (3.1) e (3.9), o modelo clássico do SEP pode ser descrito, na

referência síncrona pelo seguinte conjunto de equações diferencias:

$$\begin{aligned}
\dot{\delta}_i &= \omega_i \\
M_i\dot{\omega}_i &= P_{mi} - |E_i|^2 G_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} [|E_i||E_j|B_{ij} sen(\delta_i - \delta_j) + \\
&\quad |E_i||E_j|G_{ij} cos(\delta_i - \delta_j)] - D_i\omega_i, \quad i = 1, 2, ..., n
\end{aligned} \tag{3.18}$$

onde G_{ij} e B_{ij} são respectivamente a condutância e a susceptância equivalentes entre as máquinas "i" e "j", obtidas a partir da redução da rede aos nós internos das f.e.m.s dos geradores.

É importante notar, neste ponto da análise, que uma função energia derivada para o sistema (3.18) não conteria qualquer informação sobre o sincronismo entre as máquinas [7], uma vez que tal modelo não conteria pontos de equilíbrio no período pós-falta fazendo com que a energia cinética, armazenada nos rotores das máquinas, continuasse crescendo indefinidamente e a energia potencial do sistema decrescendo até que a energia total do sistema atingisse um valor constante, porém nenhuma informação adicional seria obtida.

A fim de contornar o problema anteriormente descrito e estabelecer o problema de sincronismo entre as máquinas [1], opta-se por escolher como referência o centro de ângulo (COA - do inglês *center of angle*) das máquinas conectadas ao SEP, definindo-se então:

$$\begin{aligned}
\theta_i &= \delta_i - \delta_0, \quad \delta_0 = \frac{1}{M_T}\sum_{i=1}^{n} M_i\delta_i \\
\tilde{\omega}_i &= \omega_i - \omega_0, \quad \omega_0 = \frac{1}{M_T}\sum_{i=1}^{n} M_i\omega_i
\end{aligned} \tag{3.19}$$

onde M_T é a soma total dos momentos de inércia dos rotores dos geradores síncronos conectadas ao SEP.

Desta maneira, assumindo o coeficiente de amortecimento dos geradores nulo[12] ($D = 0$), o modelo (3.18) pode ser expresso na referência do COA por [7]:

$$\begin{aligned}
\dot{\theta}_i &= \tilde{\omega}_i \\
M_i\dot{\tilde{\omega}}_i &= P_{mi} - |E_i|^2 G_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} [|E_i||E_j|B_{ij} sen(\theta_i - \theta_j) + \\
&\quad |E_i||E_j|G_{ij} cos(\theta_i - \theta_j)] - \frac{M_i}{M_T}P_{COA} \\
sendo\ P_{COA} &= \sum_{i=1}^{n}(P_{mi} - |E_i^2|G_{ii}) - 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} D_{ij} cos(\theta_i - \theta_j)
\end{aligned} \tag{3.20}$$

[12]Expressões gerais para o modelo (3.18), na referência do COA, quando $D \neq 0$ podem ser encontradas em [48].

onde $i = 1, 2, \cdots, n$ e n é igual ao número de máquinas síncronas conectadas ao SEP.

Uma função energia numérica para SEP multimáquinas, considerando condutâncias de transferência diferentes de zero, para o modelo (3.20) é dada por [5], [7]:

$$\begin{aligned} V(\underline{\theta}, \underline{\tilde{\omega}}) &= \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} \left[(P_{mi} - |E_i|^2 G_{ii})(\theta_i - \theta_j)\right] - \\ & \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} |E_i||E_j| B_{ij}[cos(\theta_i - \theta_j) - cos(\theta_i^s - \theta_j^s)] + \\ & \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \int_{\theta_i^s+\theta_j^s}^{\theta_i+\theta_j} |E_i||E_j| G_{ij} cos(\theta_i - \theta_j)\ d(\theta_i + \theta_j) \\ &= V_k(\underline{\tilde{\omega}}) + V_p(\underline{\theta}) \end{aligned} \tag{3.21}$$

onde $\underline{\theta}^s$ indica o a.s.e.p. do sistema (3.18), no período pós-falta.

A função energia numérica (3.21) apresenta uma integral dependente o caminho, o que significa que o sistema (3.18) não é conservativo quando as condutâncias de transferência são diferentes de zero. Porém, este termo não apresenta uma participação significativa na composição da energia potencial, o que faz com que esta função energia tenha sido empregada com sucesso em muitos casos [5].

A integral dependente do caminho em (3.21)pode ser calculada numericamente, durante a trajetória em falta do sistema, ou aproximada, admitindo que o caminho de integração seja uma reta. No segundo caso, é possível obter uma expressão analítica para a mesma [5], [7]:

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} |E_i||E_j| G_{ij} \frac{\theta_i + \theta_j - \theta_i^s - \theta_j^s}{\theta_i - \theta_j - \theta_i^s + \theta_j^s}[sen(\theta_i - \theta_j) - sen(\theta_i^s - \theta_j^s)] \tag{3.22}$$

Neste trabalho, a função energia (3.21) e a aproximação (3.22) serão utilizadas a fim de proporcionar uma maior exatidão e rapidez às análises de estabilidade transitória, dada a proposta inicial do mesmo.

Na próxima seção deste trabalho, o método PEBS será aplicado à análise de estabilidade transitória no sistema sul brasileiro equivalente reduzido, a fim de obter resultados para comparação com a análise clássica.

3.3.1 Exemplo: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido

Nesta seção, o método direto PEBS será aplicados ao estudo de estabilidade transitória do sistema sul brasileiro equivalente reduzido a fim de comparar os resultados fornecidos pelos mesmos àqueles fornecidos pela análise tradicional, anteriormente exposta neste trabalho.

Os resultados obtidos pelo método PEBS, conjuntamente com os fornecidos pela análise clássica, para a estimativa do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ estão mostrados na

tabela (3.2):

Tabela 3.2: Estimativas do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido (método direto PEBS).

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	$\hat{t}_{cr}$ (PEBS)
343 - 344	343	>1.0s	0.548s
343 - 344	344	>1.0s	0.440s
343 - 382	343	>1.0s	0.604s
343 - 382	382	0.390s	0.495s
343 - 391	343	>1.0s	0.599s
343 - 391	391	0.366s	0.361s
344 - 431	344	>1.0s	0.448s
344 - 431	431	>1.0s	0.419s
366 - 386	—	ilhamento	ilhamento
367 - 368	367	0.402s	0.397s
367 - 368	368	>1.0s	0.390s
367 - 396	367	0.403s	0.401s
367 - 396	396	0.246s	0.245s
367 - 437	367	0.409s	0.407s
367 - 437	437	0.454s	0.452s
368 - 370	368	>1.0s	0.382s
368 - 370	370	0.346s	0.331s
368 - 399	368	>1.0s	0.388s
368 - 399	399	>1.0s	0.433s
369 - 370	—	ilhamento	ilhamento
370 - 371	370	0.307s	0.303s
370 - 371	371	>1.0s	0.805s
370 - 408	370	0.323s	0.319s
370 - 408	408	0.207s	0.209s
371 - 372	371	>1.0s	0.821s
371 - 372	372	>1.0s	△△△[13]
371 - 374	371	>1.0s	0.817s
371 - 374	374	0.187s	0.184s
372 - 374	372	>1.0s	△△△
372 - 374	374	0.187s	0.184s

[13]Caso em que o método PEBS não encontra o primeiro máximo de energia potencial, em um intervalo de tempo de simulação do sistema em falta de 1s. Embora o verdadeiro tempo crítico de abertura (t_{cr}) seja maior que 1s, não se pode concluir que o SEP seja robusto à contingência sob estudo, uma vez que o PEBS pode fornecer tanto estimativas conservadoras como não conservadoras.

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	$\hat{t}_{cr}$ (PEBS)
373 - 374	—	ilhamento	ilhamento
374 - 375	374	0.158s	0.152s
374 - 375	375	>1.0s	0.419s
374 - 433	374	0.157s	0.151s
374 - 433	433	>1.0s	0.667s
375 - 376	375	>1.0s	0.422s
375 - 376	376	>1.0s	0.409s
375 - 382	375	>1.0s	0.383s
375 - 382	382	0.345s	0.490s
376 - 377	376	>1.0s	0.405s
376 - 377	377	>1.0s	0.476s
377 - 378	377	>1.0s	0.475s
377 - 378	378	>1.0s	0.412s
377 - 383	377	>1.0s	0.472s
377 - 383	383	>1.0s	0.541s
378 - 379	378	>1.0s	0.411s
378 - 379	379	>1.0s	0.434s
379 - 380	379	>1.0s	0.434s
379 - 380	380	0.399s	0.406s
379 - 385	379	>1.0s	0.442s
379 - 385	385	>1.0s	0.441s
380 - 396	380	0.378s	0.370s
380 - 396	396	0.170s	0.170s
381 - 382	—	ilhamento	ilhamento
382 - 383	382	0.401s	0.490s
382 - 383	383	>1.0s	0.523s
382 - 384	382	0.402s	0.491s
382 - 384	384	>1.0s	0.507s
382 - 386	382	0.367s	0.442s
382 - 386	386	0.393s	0.421s
382 - 398	382	0.397s	0.474s
382 - 398	398	0.334s	0.385s
383 - 384	383	>1.0s	0.536s
383 - 384	384	>1.0s	0.514s
383 - 385	383	>1.0s	0.515s
383 - 385	385	>1.0s	0.439s
386 - 387	386	0.548s	0.540s

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	$\hat{t}_{cr}$ (PEBS)
386 - 387	387	>1.0s	0.387s
387 - 402	387	>1.0s	0.396s
387 - 402	402	>1.0s	0.386s
388 - 389	388	>1.0s	0.465s
388 - 389	389	>1.0s	0.410s
388 - 414	388	>1.0s	0.466s
388 - 414	414	>1.0s	0.503s
389 - 391	389	>1.0s	0.385s
389 - 391	391	0.356s	0.367s
390 - 391	—	ilhamento	ilhamento
391 - 398	391	0.289s	0.319s
391 - 398	398	0.376s	0.476s
392 - 393	—	ilhamento	ilhamento
393 - 396	—	ilhamento	ilhamento
394 - 396	—	ilhamento	ilhamento
395 - 396	—	ilhamento	ilhamento
396 - 437	396	0.249s	0.248s
396 - 437	437	0.452s	0.451s
397 - 398	—	ilhamento	ilhamento
399 - 402	399	>1.0s	0.438s
399 - 402	402	>1.0s	0.445s
399 - 414	399	>1.0s	0.431s
399 - 414	414	>1.0s	0.458s
407 - 408	—	ilhamento	ilhamento
408 - 414	408	0.186s	0.168s
408 - 414	414	>1.0s	0.404s
430 - 431	430	>1.0s	0.407s
430 - 431	431	>1.0s	0.425s
430 - 432	430	>1.0s	0.404s
430 - 432	432	>1.0s	0.402s
430 - 433	430	>1.0s	0.402s
430 - 433	433	>1.0s	0.776s
431 - 432	431	>1.0s	0.428s
431 - 432	432	>1.0s	0.404s
432 - 433	432	>1.0s	0.396s
432 - 433	433	>1.0s	0.775s

É importante mencionar que a identificação do a.s.e.p. na configuração pós-falta do

SEP é realizada a partir do modelo original do SEP na referência do COA (3.20), através da aplicação do método de Newton-Raphson tomando, como condição inicial o a.s.e.p. da configuração pré-falta.

Deve-se observar nos resultados anteriores que as contingências que causam o ilhamento do SEP não geraram estimativas para o tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ (19% dos casos), umas vez que as mesmas são tidas como críticas para o sistema sob análise, pois o compartilhamento da demanda entre os geradores do sistema é afetado de modo a diminuir os níveis de segurança do mesmo, tais como os níveis de curto-circuito e carregamento dos equipamentos de transmissão.

Os resultados da tabela (3.2) mostram muitas discrepâncias na estimativa do $\hat{t}_{cr}$ realizada pelo método PEBS quando comparadas aos fornecidos pela análise tradicional, fornecendo tanto estimativas não conservadoras (11% dos casos), isto é, acima do verdadeiro tempo crítico de abertura t_{cr}, quanto estimativas excessivamente conservadoras (51% dos casos, considerando um desvio de -10% em relação ao t_{cr}).

Tais ocorrências provém de três circunstâncias: (i) do uso da energia potencial do ponto de cruzamento da trajetória do sistema em falta com o PEBS como estimativa para a energia crítica do sistema, (ii) do uso de uma função energia numérica (aproximada), uma vez que não existe uma função energia geral para SEPs multimáquinas considerando perdas no sistema de transmissão [16], e (iii) da existência de casos estáveis ao primeiro *swing*, o que resulta na detecção errônea do PEBS, e faz com que as estimativas tornam-se excessivamente conservadoras.

Desta forma, dada a possibilidade de obtenção de estimativas não conservadores para o tempo crítico de abertura, o método direto PEBS não é adequado para a utilização um uma ferramenta para análise de segurança dinâmica. Porém as bases teóricas desenvolvidas a partir do estudo deste método [13] tornaram-se as bases para o método direto BCU, proposto por Chiang, Wu e Varaiya [18] em 1994, que será estudado na próxima seção deste trabalho.

3.4 O método direto BCU

Muitas foram as tentativas para viabilizar o uso dos métodos diretos na análise de estabilidade transitória, porém a falta de uma fundamentação teórica dos mesmos impediu por muitos anos sua aplicação em sistemas reais. Nesta seção o método BCU, derivado dos resultados teóricos obtidos no estudo de diversos métodos anteriores, será apresentado e discutido em detalhes, a fim de justificar sua utilização na análise de estabilidade transitória.

Em 1994, Chiang, Wu e Varaiya [18] propuseram um novo método para análise de estabilidade transitória, denominado BCU (do inglês *Boundary Controlling Unstable Equilibrium Point*), baseado em seus estudos anteriores sobre os métodos diretos [11], [13].

Neste novo método direto, muitas das dificuldades que impediram a utilização de outros métodos foram transpassadas como será observado ao longo de toda esta seção.

O método BCU é um algoritmo numérico para o cálculo do c.u.e.p., que utiliza uma caracterização precisa da fronteira da região de estabilidade de forma a garantir e a diminuir o conservadorismo da estimativa do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$. Para tanto, um sistema gradiente reduzido, na mesma forma de (3.15), é empregado para realizar o cálculo do c.u.e.p., diminuindo significativamente o esforço computacional requerido nesta tarefa.

Sendo requerida a existência de um sistema gradiente reduzido, para que o método BCU possa ser aplicado, algumas hipóteses se fazem necessárias sobre o SEP:

- O modelo clássico do SEP pode ser utilizado para representar a dinâmica das máquinas síncronas conectadas ao sistema;
- As condutâncias de transferência do SEP são pequenas o bastante para serem desprezadas na modelagem, resultando no sistema (3.13);
- O sistema (3.13) satisfaz as condições (2.A1)-(2.A4);

Desta forma, modificando suavemente o sistema gradiente reduzido (3.15) chega-se ao sistema original (3.13), fazendo uso dos seguintes passos intermediários [18], [20]:

$$\dot{\delta} = -\frac{\partial V_p(\delta)}{\partial \delta} \longleftrightarrow \begin{array}{c} \dot{\delta} = -\frac{\partial V_p(\delta)}{\partial \delta} \\ M\dot{\omega} = -D\omega \end{array} \longleftrightarrow \begin{array}{c} \dot{\delta} = \omega \\ M\dot{\omega} = -D\omega - \frac{\partial V_p(\delta)}{\partial \delta} \end{array} \tag{3.23}$$

Os passos anteriores consistem na demonstração das seguintes relações de equivalência estáticas e dinâmicas [18], [20], entre os sistemas gradiente reduzido (3.15) e o sistema original (3.13) :

(3.R1) $\underline{\hat{\delta}}$ é um ponto de equilíbrio estável (instável) de (3.15) se e somente se $(\underline{\hat{\delta}}, 0)$ é um ponto de equilíbrio estável (instável) de (3.13);

(3.R2) $\underline{\hat{\delta}}$ é um ponto de equilíbrio tipo k de (3.15) se e somente se $(\underline{\hat{\delta}}, 0)$ é um ponto de equilíbrio tipo k de (3.13);

(3.R3) $\underline{\delta}_u$ é um u.e.p. na fronteira de estabilidade de um a.s.e.p. $\underline{\delta}_s$ de (3.15) se e somente se $(\underline{\delta}_u, \underline{0})$ é um u.e.p. na fronteira de estabilidade de um a.s.e.p. $(\underline{\delta}_s, \underline{0})$ de (3.13).

Como anteriormente exposto neste trabalho, é válido fazer menção que a demonstração das relações de equivalência somente será possível se a hipótese (2.A3) for também satisfeita para a variação de um parâmetro do sistema [47].

Logo, da relação existente entre os sistemas (3.15) e (3.13), e baseado nas caracterizações (2.5) e (3.17), Chiang, Wu e Varaiya [18] propuseram a seguinte definição para o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido:

Definição 3.4.1 (Definição do Ponto de Equilíbrio de Controle do Sistema Gradiente Reduzido [18]). *O c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido é definido como sendo o u.e.p.* $\underline{\delta}_u$*, localizado na fronteira da região de estabilidade de um a.s.e.p.* $\underline{\delta}_s$*, cuja variedade estável contém o ponto em que a projeção da trajetória do sistema em falta cruza a fronteira de estabilidade do sistema gradiente reduzido.*

Assim, uma vez determinado o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15), utilizando a relação (3.R3), obtém-se o c.u.e.p. do sistema original (3.13). É importante mencionar que, neste trabalho, o ponto de cruzamento da fronteira da região de estabilidade do sistema gradiente reduzido (3.15) será denominado por *exit point*.

Desta maneira, o método BCU, aplicado à análise de estabilidade transitória de SEPs, pode ser resumido nas seguintes etapas, ilustradas na figura (3.5):

1. A partir da trajetória em falta do sistema original $(\underline{\delta}(t), \underline{\omega}(t))$, determine a trajetória projetada do sistema gradiente reduzido $\underline{\delta}(t)$, de forma a identificar o *exit point* $\underline{\delta}^*$, no qual a trajetória projetada cruza a fronteira da região de estabilidade do sistema gradiente reduzido[14];

2. Use o ponto $\underline{\delta}^*$ como condição inicial para integrar o sistema gradiente reduzido pós-falta e encontre o primeiro ponto de mínimo da norma da função $f_i(\delta)$ (3.15) dada por:
$$\sum_{i=1}^{n} \|f_i(\underline{\delta})\|$$
e seja este ponto $\underline{\delta}_0^*$ o ponto de mínimo gradiente (m.g.p. - do inglês *minimum gradient point*);

3. Use o ponto $\underline{\delta}_0^*$ como condição inicial para resolver[15]
$$\sum_{i=1}^{n} \|f_i(\underline{\delta})\| = 0$$
e seja este ponto $\underline{\delta}_{co}^*$ o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15);

4. Defina o c.u.e.p. do sistema original, com respeito à trajetória em falta sob estudo, como sendo $(\underline{\delta}_{co}^*, 0)$ e conclua sobre a estabilidade do SEP utilizando o método do c.u.e.p.;

[14] É importante ressaltar que devido à imprecisões numéricas no cálculo do *exit point*, o mesmo é obtido de maneira aproximada e portanto não estará exatamente sobre a variedade estável do c.u.e.p., o que justifica os passos 2 e 3 do método BCU. Caso contrário a simples integração numérica do sistema gradiente reduzido pós-falta seria suficiente para a obtenção do ponto de equilíbrio instável de controle.

[15] Neste trabalho o método de Newton-Raphson para o cálculo de raízes (zeros) de funções será utilizado no cálculo de pontos de equilíbrio dada a sua facilidade de implementação.

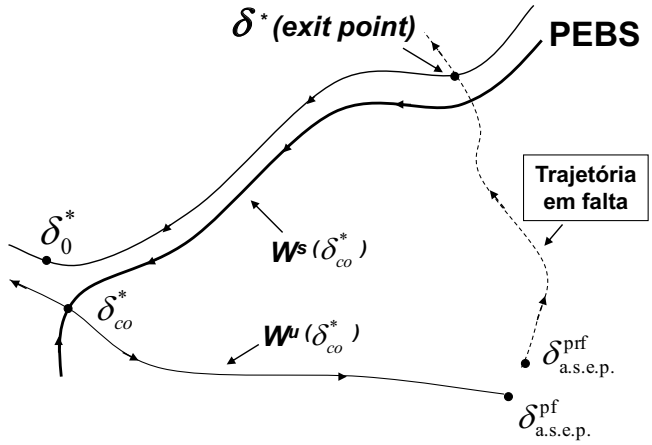

Figura 3.5: Método BCU.

O método BCU, exposto acima, visa a determinação do c.u.e.p. através de uma série de aproximações: primeiramente determinando o ponto onde ocorre o cruzamento da fronteira de estabilidade do sistema gradiente reduzido (PEBS), o que pode ser feito encontrando o primeiro máximo de $V_p(\underline{\delta})$, sendo este ponto pertencente à variedade estável do c.u.e.p., o método tenta caminhar ao longo da mesma de forma a se aproximar deste ponto, e por fim, utilizando esta estimativa encontra o c.u.e.p. correto para a trajetória em falta do sistema gradiente reduzido, determinando conseqüentemente o c.u.e.p. do sistema original.

Teoricamente não existem falhas no método BCU, porém na literatura encontram-se relatos onde a aplicação deste método não foi bem sucedida. Llamas et al [37], relataram algumas falhas na obtenção de estimativas do $\hat{t}_{cr}$, quando verificou que em alguns casos o SEP tornava-se instável em *swings* subseqüentes ao primeiro, associando tais falhas à não satisfação da condição de transversalidade (2.A3).

Com base nos resultados teóricos anteriormente expostos é possível afirmar que o c.u.e.p. é sempre determinado pelo método BCU, desde que as hipóteses adequadas sejam satisfeitas. Porém, a maior dificuldade na implementação do mesmo são as imprecisões numéricas geradas nos cálculos por computador.

Desta maneira, cada um dos 4 passos que compõem o método BCU representa um desafio à pesquisa, desde a detecção do *exit point*, do m.g.p. e do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15). Tais dificuldades foram estudadas por muitos pesquisadores e diversas propostas foram feitas a fim de superá-las:

- Detecção do *exit point*: o ponto onde a energia potencial $V_p(\underline{\delta})$ atinge o primeiro máximo é tomado como o ponto onde a projeção da trajetória em falta do sistema gradiente reduzido (3.15) cruza o PEBS, porém isto só é verdade quando tal cruzamento se dá de maneira ortogonal, caso contrário o primeiro máximo de $V_p(\underline{\delta})$ pode não estar sobre a fronteira do PEBS.

Entre as propostas para superar esta dificuldade, Scruggs e Mili [55], em 2001, propuseram a detecção do *exit point* através de um método PEBS dinâmico, no qual o sistema gradiente reduzido (3.15) pós-falta é integrado a partir dos pontos sobre a trajetória em falta deste mesmo sistema, verificando deste modo se o ponto tomado como condição inicial está ou não dentro da região delimitada pelo PEBS e determinando de maneira recursiva o *exit point*.

A principal desvantagem na implementação deste método é o alto esforço computacional requerido na integração numérica do sistema gradiente reduzido (3.15) pós-falta, o que acaba por tornar a análise de estabilidade transitória muito lenta.

Uma melhoria no método PEBS dinâmico foi proposto por Nazareno, Alberto e Bretas [46], em 2004, tornando o algoritmo proposto anteriormente por Scruggs e Mili [55] mais robusto, porém ainda sendo necessário um alto esforço computacional. Em virtude desta desvantagem, o método PEBS dinâmico não será discutido em detalhes neste trabalho, uma vez que sua utilização impossibilitaria a análise de estabilidade transitória para fins da avaliação da segurança dinâmica de SEPs em tempo real.

- Detecção do m.g.p. e do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido: a detecção do "ponto de mínimo gradiente" é realizada a partir de um processo de integração do sistema gradiente reduzido (3.15) pós-falta, tomando como condição inicial o *exit point*, porém se o último não estiver sobre a fronteira do PEBS, a trajetória pós-falta pode se afastar da fronteira da região de estabilidade, ou mesmo estando sobre esta fronteira, tal ponto de mínimo pode ocorrer próximo à um ponto de equilíbrio de tipo $k > 1$, distante do c.u.e.p.[16] do sistema gradiente reduzido, fazendo com que o BCU encontre um u.e.p. diferente do c.u.e.p..

  Com a finalidade de superar as dificuldades acima, Treinen, Vittal e Kliemann [61] propuseram, em 1996, um algoritmo iterativo para melhorar a robustez numérica do método BCU na determinação do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido, conhecido como *Shadowing Method*. Este algoritmo é composto das seguintes etapas [46], [61]:

  1. Defina $i \in [1, 2, ..., N]$, onde N é o número de iterações (ciclos) necessárias[17] para que o c.u.e.p. seja encontrado. Vá para a etapa 2;
  2. Integre o sistema gradiente reduzido (3.15) pós-falta e obtenha $\underline{\delta}_i = \Phi(\underline{\delta}_{m(i-1)}, t_i)$, sendo $\underline{\delta}_{m0} = \underline{\delta}^*$ e t_i é suficientemente pequeno. Vá para a etapa 3;

[16] O c.u.e.p. pode ser caracterizado, pela continuidade da função energia $V(\underline{\delta}, \underline{\omega})$ e baseado na caracterização (2.6), como sendo um ponto de equilíbrio instável de tipo 1 [11].

[17] O número máximo de ciclos (iterações), N, do algoritmo *Shadowing Method* é, geralmente, determinado com base em alguns estudos de caso, para o SEP sob estudo, e na respectiva definição de um possível número máximo de iterações.

3. Calcule o conjunto $R(\underline{\delta}_i) = \{\underline{\delta} \in \mathbb{R}^n : \ \underline{\delta} = \ \alpha(\underline{\delta}_i - \underline{\delta}_s^{pf}) + \underline{\delta}_s^{pf}, \ \alpha \in \mathbb{R} \ e \ \alpha \geq 0\}$, onde $\underline{\delta}_s^{pf}$ é o a.s.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15) pós-falta. Vá para a etapa 4;

4. Encontre $\underline{\delta}_{mi} \in R(\underline{\delta}_i)$ satisfazendo:

$$-\frac{\partial V_p(\underline{\delta})}{\partial \delta_{mi}}(\delta_{mi} - \delta_s^{pf}) = 0$$

   Se $i < N$ retorne a etapa 2 até que uma aproximação[18] para o c.u.e.p. seja encontrada, caso contrário o *Shadowing Method* não foi capaz de encontrar uma aproximação para o c.u.e.p. dentro de N ciclos;

O algoritmo *Shadowing Method* é essencialmente um método recursivo para corrigir a trajetória do sistema gradiente reduzido (3.15) pós-falta durante a busca pelo c.u.e.p. deste sistema. No primeiro passo, a partir do *exit point*, integra-se o sistema gradiente reduzido (3.15) pós-falta por um intervalo de tempo t_i suficientemente pequeno, construindo, então, o conjunto parametrizado $R(\delta_i)$ e determinando o ponto sobre o PEBS pertencente a este conjunto. Tal procedimento é repetido até que o c.u.e.p. seja atingido, conforme a figura (3.6).

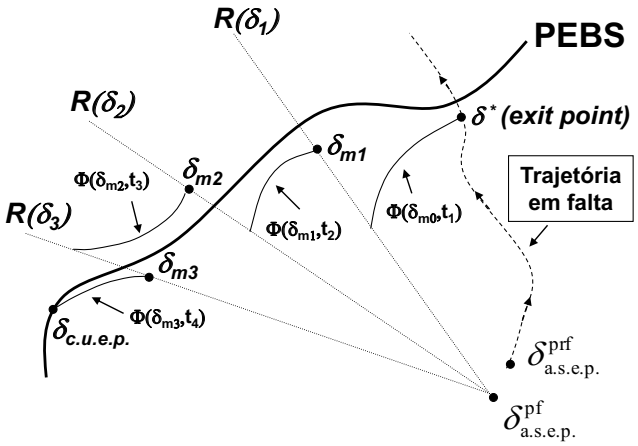

Figura 3.6: Algoritmo *Shadowing Method.*

Atualmente, a aplicação deste método é reconhecida como essencial para garantir a robustez numérica do método BCU, sendo portanto fundamental sua aplicação nas análises realizadas neste trabalho.

Uma vez tendo discutido as bases teóricas do método BCU, na próxima seção deste trabalho, o mesmo será aplicado à análise de estabilidade transitória do sistema sul brasileiro

[18] A aproximação do c.u.e.p., ao longo da trajetória do sistema gradiente reduzido (3.15) pós-falta, pode ser detectada a partir de diversos modos, sendo, neste trabalho, adotada uma tolerância mínima, ϵ, para a norma $\sum_{i=1}^{n} \|f_i(\underline{\delta})\|$ como critério de parada para o algoritmo *Shadowing Method.*

equivalente reduzido, a fim de comparar seus resultados com os fornecidos pela análise clássica.

3.4.1 Exemplo: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido

Nesta seção, o método direto BCU associado ao algoritmo *Shadowing Method* será aplicado ao estudo de estabilidade transitória do sistema sul brasileiro equivalente reduzido a fim de comparar os resultados fornecidos pelos mesmos àqueles fornecidos pela análise clássica, anteriormente estudada neste trabalho.

Os resultados obtidos pelo método BCU, conjuntamente com os fornecidos pela análise clássica, para a estimativa do tempo crítico de abertura t_{cr} estão mostrados na tabela (3.3):

Tabela 3.3: Estimativas do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$ para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido (método direto BCU + *Shadowing Method*).

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	$\hat{t}_{cr}$ (BCU)
343 - 344	343	>1.0s	$\otimes\otimes\otimes$[19]
343 - 344	344	>1.0s	$\otimes\otimes\otimes$
343 - 382	343	>1.0s	$\otimes\otimes\otimes$
343 - 382	382	0.390s	0.460s
343 - 391	343	>1.0s	$\otimes\otimes\otimes$
343 - 391	391	0.366s	0.329s
344 - 431	344	>1.0s	$\otimes\otimes\otimes$
344 - 431	431	>1.0s	$\otimes\otimes\otimes$
366 - 386	—	ilhamento	ilhamento
367 - 368	367	0.402s	0.399s
367 - 368	368	>1.0s	$\bullet\bullet\bullet$[20]
367 - 396	367	0.403s	0.401s
367 - 396	396	0.246s	0.244s
367 - 437	367	0.409s	0.406s
367 - 437	437	0.454s	0.452s
368 - 370	368	>1.0s	$\bullet\bullet\bullet$
368 - 370	370	0.346s	0.323s
368 - 399	368	>1.0s	$\bullet\bullet\bullet$
368 - 399	399	>1.0s	$\oslash\oslash\oslash$[21]

[19] Caso onde o c.u.e.p. foi identificado incorretamente, uma vez que a energia potencial no mesmo é maior que a do *exit point*, ou seja, $V_p(\delta_{c.u.e.p.}) > V_p\delta_{exitpoint}$, ou o método convergiu para um a.s.e.p..

[20] Caso onde o algoritmo Shadowing Method não conseguiu encontrar uma aproximação para o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido.

[21] Caso em que o c.u.e.p. não foi identificado pelo método de Newton-Raphson no terceiro passo do

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	$\hat{t}_{cr}$ (BCU)
369 - 370	—	ilhamento	ilhamento
370 - 371	370	0.307s	0.285s
370 - 371	371	>1.0s	⊗⊗⊗
370 - 408	370	0.323s	0.301s
370 - 408	408	0.207s	0.204s
371 - 372	371	>1.0s	⊗⊗⊗
371 - 372	372	>1.0s	△△△
371 - 374	371	>1.0s	⊗⊗⊗
371 - 374	374	0.187s	0.184s
372 - 374	372	>1.0s	△△△
372 - 374	374	0.187s	0.184s
373 - 374	—	ilhamento	ilhamento
374 - 375	374	0.158s	0.150s
374 - 375	375	>1.0s	⊗⊗⊗
374 - 433	374	0.157s	0.147s
374 - 433	433	>1.0s	⊗⊗⊗
375 - 376	375	>1.0s	⊗⊗⊗
375 - 376	376	>1.0s	•••
375 - 382	375	>1.0s	•••
375 - 382	382	0.345s	0.445s
376 - 377	376	>1.0s	•••
376 - 377	377	>1.0s	⊗⊗⊗
377 - 378	377	>1.0s	⊗⊗⊗
377 - 378	378	>1.0s	⊗⊗⊗
377 - 383	377	>1.0s	⊗⊗⊗
377 - 383	383	>1.0s	⊗⊗⊗
378 - 379	378	>1.0s	⊗⊗⊗
378 - 379	379	>1.0s	⊗⊗⊗
379 - 380	379	>1.0s	⊗⊗⊗
379 - 380	380	0.399s	0.392s
379 - 385	379	>1.0s	⊗⊗⊗
379 - 385	385	>1.0s	⊘⊘⊘
380 - 396	380	0.378s	0.350s
380 - 396	396	0.170s	0.166s
381 - 382	—	ilhamento	ilhamento
382 - 383	382	0.401s	0.451s

método BCU.

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	$\hat{t}_{cr}$ (BCU)
382 - 383	383	>1.0s	⊘ ⊘ ⊘
382 - 384	382	0.402s	0.453s
382 - 384	384	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
382 - 386	382	0.367s	⊘ ⊘ ⊘
382 - 386	386	0.393s	0.361s
382 - 398	382	0.397s	0.449s
382 - 398	398	0.334s	0.438s
383 - 384	383	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
383 - 384	384	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
383 - 385	383	>1.0s	⊘ ⊘ ⊘
383 - 385	385	>1.0s	⊘ ⊘ ⊘
386 - 387	386	0.548s	0.526s
386 - 387	387	>1.0s	⊘ ⊘ ⊘
387 - 402	387	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
387 - 402	402	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
388 - 389	388	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
388 - 389	389	>1.0s	⊘ ⊘ ⊘
388 - 414	388	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
388 - 414	414	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
389 - 391	389	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
389 - 391	391	0.356s	0.353s
390 - 391	—	ilhamento	ilhamento
391 - 398	391	0.289s	0.262s
391 - 398	398	0.376s	• • •
392 - 393	—	ilhamento	ilhamento
393 - 396	—	ilhamento	ilhamento
394 - 396	—	ilhamento	ilhamento
395 - 396	—	ilhamento	ilhamento
396 - 437	396	0.249s	0.247s
396 - 437	437	0.452s	0.450s
397 - 398	—	ilhamento	ilhamento
399 - 402	399	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
399 - 402	402	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
399 - 414	399	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
399 - 414	414	>1.0s	⊗ ⊗ ⊗
407 - 408	—	ilhamento	ilhamento
408 - 414	408	0.186s	0.172s

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	$\hat{t}_{cr}$ (BCU)
408 - 414	414	>1.0s	•••
430 - 431	430	>1.0s	•••
430 - 431	431	>1.0s	⊗⊗⊗
430 - 432	430	>1.0s	•••
430 - 432	432	>1.0s	•••
430 - 433	430	>1.0s	•••
430 - 433	433	>1.0s	⊗⊗⊗
431 - 432	431	>1.0s	⊗⊗⊗
431 - 432	432	>1.0s	•••
432 - 433	432	>1.0s	•••
432 - 433	433	>1.0s	⊗⊗⊗

Como anteriormente, as contingências que provocam o ilhamento do SEP na configuração pós-falta não geraram estimativas para o tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$, uma vez que são admitidas críticas ao sistema por afetar o compartilhamento da demanda pelos geradores conectados ao sistema.

Os resultados da tabela (3.3) mostram que, em muitos casos (74%), uma estimativa para o t_{cr} não foi obtida. Porém tais falhas não se relacionam a aspectos teóricos, mas sim à robustez numérica dos métodos empregados em cada um dos quatro passos que compõem o método BCU.

Tais ocorrências resultam de duas circunstâncias: (i) do uso de uma função energia numérica (aproximada), uma vez que não existe uma função energia exata para SEPs considerando perdas no sistema de transmissão [16], o que faz com que a dinâmica do sistema original não seja completamente capturada pelo sistema gradiente reduzido aproximado, e (ii) ineficiência numérica do algoritmo para o cálculo do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15). É importante ressaltar que neste trabalho o método de Newton-Raphson foi utilizado no cálculo do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (passo 3 do método BCU).

Observa-se também, em alguns casos (5%), uma estimativa não conservadora para o t_{cr}. Tais ocorrências provém do fato de que o c.u.e.p. calculado pode não estar na fronteira do sistema gradiente reduzido (3.15), ou seja, o teorema (2.4.4) não é satisfeito, ou o da convergência do método de Newton-Raphson, no terceiro passo do método BCU, para um ponto de equilíbrio diferente do c.u.e.p..

É importante ressaltar que embora o método direto BCU tenha fornecido estimativas não conservadoras, as deficiências relacionadas à tais estimativas estão nos métodos numérico empregados nos passos que compõem o método BCU e não em sua teoria. Desta forma, é possível estabelecer padrões de referência (índices), baseados nos próprios passos do método BCU, que informem quando existe ou não a possibilidade de inexatidão nas

estimativas do tempo crítico de abertura fornecidos pelo método, tais padrões serão utilizados no desenvolvimento dos filtros classificadores BCU que irão compor a ferramenta de análise de segurança dinâmica proposta neste trabalho, assegurando assim o conservadorismo das análises e possibilitando, como será discutido adiante neste trabalho, a velocidade necessária à sua aplicação em tempo real.

Capítulo 4

Ferramenta para Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA, de SEPs - Modelos Reduzidos

4.1 Introdução

Neste capítulo, uma ferramenta computacional para análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, é proposta e aplicada ao estudo de SEPs utilizando modelos reduzidos. Tal ferramenta é composta por uma série de filtros classificadores, cujo grau de refinamento aumenta à medida que a análise progride, a fim de classificar as contingências quanto à estabilidade transitória do sistema sob análise.

Reconhece-se, na literatura [6], [10], [23], a vantagem da aplicação dos métodos diretos para análise de contingências, no contexto TSA, uma vez que os mesmos provêem a velocidade necessária às análises em tempo real. Dessa forma, os métodos diretos PEBS e BCU serão utilizados, neste trabalho, a fim de possibilitar a análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, em tempo real.

4.2 Ferramenta para Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA, de SEPs em Tempo Real

O principal objetivo da análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, é identificar, dada uma lista de possíveis contingências, aquelas que são críticas, com relação à estabilidade transitória, ao SEP sob análise. Para tanto uma ferramenta computacional para análise em tempo real é necessária, uma vez que com as freqüentes mudanças topológicas e no ponto de operação do SEP a mesma é inúmeras vezes requerida.

Observam-se na literatura algumas tendências em relação à análise de contingências aplicadas à análise de segurança dinâmica de SEPs, entre as quais duas se destacam [6]:

- Do ponto de vista computacional: aumentar a velocidade da simulação não linear do SEP, utilizando modelos detalhados dos componentes do mesmo, a fim de realizar análises mais precisas e no menor tempo possível;

- Do ponto de vista do controle preventivo: localizar os possíveis efeitos das faltas sobre o SEP, na tentativa de criar estratégias de controle que possam garantir a segurança do SEP e evitar possíveis danos ao mesmo.

Tais tendências tem por objetivo prover uma maior exatidão às análises, de modo a diminuir os conservadorismos das mesmas, e possibilitar meios de prever ou mesmo corrigir eventuais ocorrências críticas nos SEPs.

A partir de dados medidos em tempo real do SEP, obtém-se a topologia do sistema e o seu estado atual, através de um estimador de estados [1], e a uma lista de possíveis contingências para o mesmo, definida pelo operador do sistema, e com base nestas informações procede-se a análise das contingências. Neste trabalho, uma ferramenta computacional para classificação de contingências via métodos diretos é proposta, baseada na utilização de uma série de filtros classificadores, como mostrado na figura (4.1).

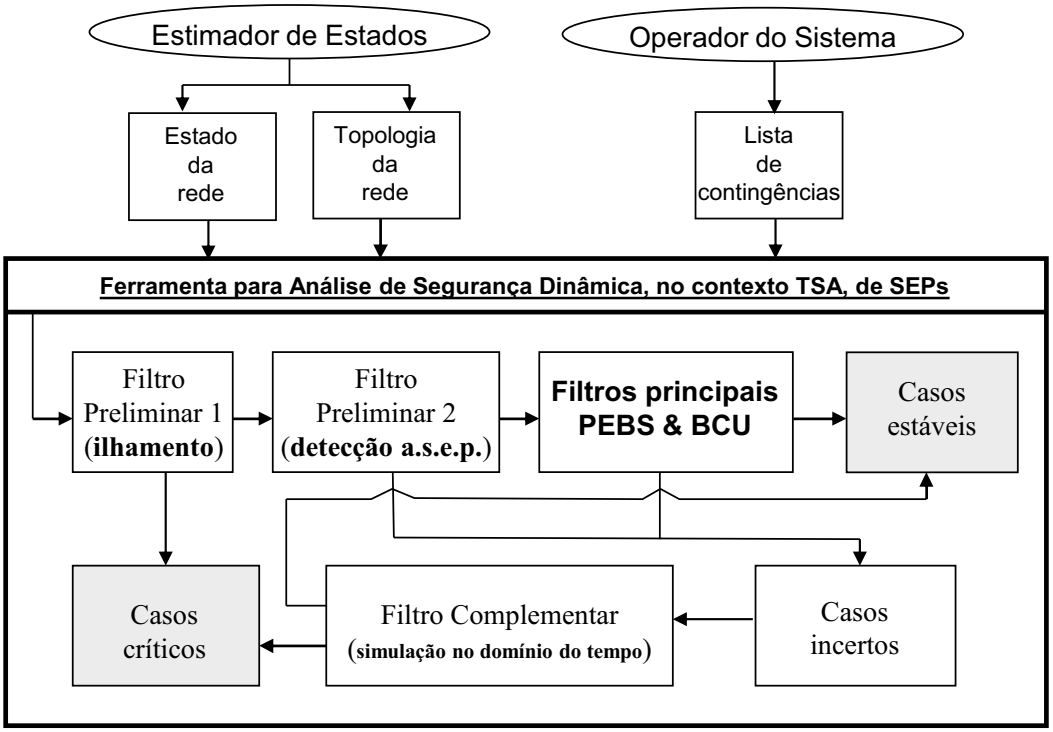

Figura 4.1: Ferramenta Computacional para Análise de Segurança Dinâmica, no contexto TSA, de SEPs baseada em métodos diretos.

[1] O estimador de estados é hoje a ferramenta mais adequada para o cálculo do estado do SEP (tensões complexas nas barras do mesmo), uma vez que seu funcionamento se baseia no processamento estatístico de um conjunto redundante de medidas, obtidas em tempo real, e, diferentemente do cálculo convencional de fluxo de potência, torna possível a análise e eliminação de erros provenientes da etapa de medição.

Estes filtros são concebidos de forma a identificar numa primeira fase as seguintes condições críticas:

1. Ocorrência de ilhamento no SEP;

2. Não existência de um a.s.e.p. no sistema pós-falta.

Tais filtros têm a finalidade de identificar de forma rápida e eficiente, num primeiro instante, contingências críticas e casos incertos (possivelmente críticos) ao SEP sob análise, de forma a concluir, o quanto antes, sobre a estabilidade dos casos.

As análises preliminares visam identificar, primeiramente, casos onde o sistema pós-falta apresenta-se ilhado, ou seja, fisicamente separado em duas áreas disjuntas, de modo que para estes casos nenhuma análise posterior é necessária e estes são listados ao final da análise de segurança dinâmica como casos críticos ao SEP sob análise, e, num segundo momento, identificar casos incertos onde o a.s.e.p. da configuração pós-falta do SEP possivelmente não exista, impedindo que estes casos sejam analisados pelos filtros classificadores BCU e enviando tais ocorrências diretamente para o filtro classificador complementar (simulação no domínio do tempo) que irá concluir sobre a estabilidade dos mesmos.

Numa segunda fase, filtros classificadores baseados nos método diretos PEBS e BCU são utilizados para realizar uma análise refinada das contingências restantes. Tais análises visam identificar casos altamente estáveis[2] e casos incertos[3], em cada passo do método BCU, e impedir que estes sejam propagados para análises posteriores, no primeiro caso, ou enviando diretamente para o filtro classificador complementar, responsável pela simulação no domínio do tempo do caso sob análise, no segundo caso, diminuindo assim, em cada etapa do processo de classificação, o número de contingências a serem analisadas pelos próximos filtros classificadores e consecutivamente o tempo final de processamento.

Os classificadores baseados no método BCU visam, primordialmente, identificar possíveis casos onde imprecisões numéricas possam vir a resultar na classificação errônea de uma contingência, identificando casos onde [22], [23]:

1. Existe imprecisão na identificação do *exit point* (falha do método PEBS);

2. Há inconsistência na identificação do m.g.p.;

3. Existe possibilidade de identificação errônea do c.u.e.p..

Como resultado desta segunda fase, uma lista de contingências classificadas como casos instáveis e casos incertos é obtida. Porém, dado o caráter conservador das estimativas

[2]Neste trabalho o termo "altamente estável" será utilizado para fazer menção ao fato de que o tempo crítico de abertura, t_{cr}, para a contingência sob análise é muito maior que o respectivo tempo de abertura, t_{ab}, para a atuação do sistema de proteção associado.

[3]Um caso é classificado como "incerto" se o mesmo apresenta condições que possam denegrir a exatidão dos cálculos efetuados pelo método BCU.

obtidas pelos classificadores BCU, uma análise final no domínio do tempo é realizada, resolvendo o sistema de equações diferenciais do modelo reduzido (3.18), que descreve a dinâmica do SEP, de forma a verificar as verdadeiras contingências críticas do sistema sob estudo.

Um exemplo da aplicação da ferramenta proposta no processo de seleção de contingências, dada uma lista de contingências definida pelo operador do sistema, na análise de segurança dinâmica, é mostrado na figura (4.2). Observa-se que um número muito menor de simulações, no domínio do tempo, é exigido de modo a possibilitar a análise de segurança dinâmica em tempo real.

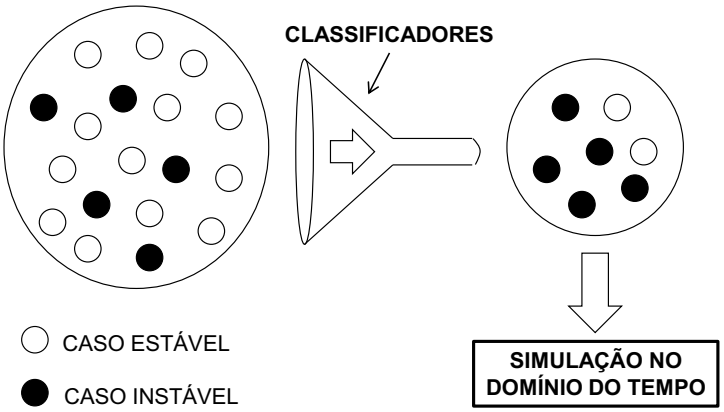

Figura 4.2: Aplicação da Ferramenta Computacional para Análise de Segurança Dinâmica na Seleção de Casos enviados para a Simulação no Domínio do Tempo.

É importante ressaltar que para um SEP, bem planejado e projetado, o número de casos estáveis é muito maior que o número de casos instáveis, o que torna pequena a necessidade de simulações no domínio do tempo.

Nas próximas seções deste trabalho uma descrição detalhadas dos filtros que compõem a ferramenta de análise de segurança dinâmica aqui proposta será realizada a fim de possibilitar sua implementação e aplicação em SEPs de grande porte.

4.2.1 Filtro Preliminar para Detecção de Ilhamento

O primeiro filtro classificador preliminar que compõe a ferramenta de análise de segurança dinâmica proposta neste trabalho é um filtro para detecção de ilhamento no SEP pós-falta.

O filtro para detecção de ilhamento foi concebido a partir das idéias expostas por London, Alberto e Bretas em 2007 [41]. Tais idéias sugerem a fatoração da "matriz incidência barra-ramo" como uma forma de localizar os ramos (linhas de transmissão/-transformadores) cuja retirada do SEP causaria o ilhamento de uma ou mais barras do mesmo.

A "matriz incidência barra-ramo", $\underline{H}$, descreve a topologia da rede transmissão de um determinado SEP através de uma matriz esparsa[4], onde os elementos não nulos descrevem as interconexões entre as barras do sistema através dos ramos do mesmo, sendo sua definição formal apresentada a seguir.

Definição 4.2.1 (Matriz incidência barra-ramo $\underline{H}$ [54])**.** *Chama-se "matriz incidência barra-ramo", e denota-se por $\underline{H}$, a matriz associada ao SEP cujos elementos são definidos pela relação:*

$$h_{ij} = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \textit{se o ramo "}j\textit{" é incidente à barra "}i\textit{";} \\ 0 & \textit{caso contrário.} \end{array} \right\} \tag{4.1}$$

onde $i = 1, ..., n$ e $j = 1, ..., k$, sendo n e k respectivamente o número de barras e de ramos que compõem o SEP.

É importante observar que cada coluna da matriz incidência barra-ramo H possui exatamente 2 elementos não nulos. Tal fato será amplamente explorado nas demonstrações dos resultados propostos neste trabalho.

Desta maneira, uma vez definida a matriz incidência $\underline{H}$, baseado nas idéias de análise de redundância de medidas expostas em [41], podemos analisar a redundância dos ramos do SEP e determinar quais desses ramos são críticos ao mesmo, ou seja, determinam um caminho[5] único de interconexão entre duas barras do sistema, e cuja perda impossibilita a conexão das mesmas por qualquer outro caminho do SEP.

Tal análise é realizada a partir da fatoração triangular, via eliminação de Gauss (escalonamento) ou algoritmos LDU [9], da matriz incidência $\underline{H}$ exibindo assim a dependência linear existente entre os diversos ramos do sistema, de forma a concluir quando a perda de um determinado caminho pode ser compensada pela existência de um outro caminho dentro do SEP, ou seja, realiza em sua essência uma transformação no espaço das barras do sistema, de forma a determinar a relação entre as mesmas e os ramos do sistema.

A análise da "matriz incidência barra-ramo fatorada", $\underline{H}_F$, possibilita a localização de todos os ramos críticos do sistema, com uma grande economia de esforço computacional, uma vez que apenas uma fatoração é necessária para a determinação de todos os possíveis casos de ilhamento.

Com a finalidade de embasar teoricamente o método proposto na seqüência desta seção, as principais definições e resultados utilizados serão enunciados e demonstrados a seguir.

[4]Uma matriz é dita "esparsa" se a mesma possui um grande número de entradas (elementos) iguais a zero, ou seja, a relação (razão) entre o número de elementos nulos e o número total de elementos da mesma é próxima de 1 [58].

[5]A palavra "caminho" é utilizada, neste trabalho, para designar a conexão elétrica entre dois elementos do sistema de transmissão do SEP através de linhas de transmissão, subestações e transformadores.

Definição 4.2.2 (Conexidade de um SEP). *Um SEP é conexo se e somente se todas as barras que compõem seu sistema de transmissão estão conectadas através dos ramos (linhas de transmissão / transformadores) deste.*

Teorema 4.2.1 (Máximo Posto da Matriz Incidência Barra-Ramo $\underline{H}$ [54]). *Considere um SEP composto por* $\mathbf{n}$ *barras e* $\mathbf{m} \geq (\mathbf{n}\text{-}1)$ *ramos. Se este sistema é conexo, então, o posto da "matriz incidência barra-ramo",* $\rho(\underline{H})$*, na álgebra módulo-2 (no apêndice B deste trabalho, uma breve discussão a respeito da álgebra módulo-2 aqui utilizada é apresentada ao leitor interessado), é no máximo igual a* $\mathbf{n}\text{-}1$.

Prova 4.2.1 (Prova do Teorema do Máximo Posto da Matriz Incidência $\underline{H}$). *A demonstração deste resultado é imediata, uma vez que cada vetor coluna da matriz incidência* $\underline{H}$ *contém exatamente dois elementos diferentes de zero e iguais a 1, e sendo 1+1=0 na álgebra módulo-2, resulta que a soma de todos os n vetores linha que compõem a matriz incidência* $\underline{H}$ *é nula, ou seja, são linearmente dependentes. Deste modo, tem-se que:*

$$\rho(\underline{H}) < \mathbf{n} \Longrightarrow \rho(\underline{H}) \leq \mathbf{n} - 1 \tag{4.2}$$

e o resultado está demonstrado. □

Teorema 4.2.2 (Conexidade da Matriz Incidência Barra-Ramo $\underline{H}$ [54]). *Considere um SEP composto por* $\mathbf{n}$ *barras e* $\mathbf{m} \geq (\mathbf{n}\text{-}1)$ *ramos. Se este sistema é conexo, então, para qualquer* $L<\mathbf{n}$*, a soma (na álgebra módulo 2) de quaisquer L vetores linha da matriz incidência* $\underline{H}$ *é um vetor diferente de zero.*

Prova 4.2.2 (Prova do Teorema da Conexidade da Matriz Incidência $\underline{H}$). *Suponha que para* $L<\mathbf{n}$*, onde* $L \in \mathbb{N}^*$*, a soma (na álgebra módulo 2) dos primeiros L vetores-linha da matriz incidência* $\underline{H}$ *é um vetor nulo. Tal fato só é verdade se cada coluna da matriz* $\underline{H}^L$*, formada pelo agrupamento dos primeiros L vetores linha de* $\underline{H}$*, contiver um número par de elementos 1, ou seja, dois ou nenhum.*

Sendo assim, pode-se permutar as colunas de $\underline{H}$*, de modo que as k primeiras colunas contenham dois elementos iguais a 1, entre os primeiros L elementos, e conseqüentemente as* $\mathbf{m}$*-k colunas restantes contenham os L primeiros elementos nulos. Assim,*

$$\underline{H} = \left[\begin{array}{c|c} [\underline{H}_{(L)}]_{(L\times k)} & [\underline{0}]_{[L\times(m-k)]\}} \\ \hline [\underline{0}]_{[(n-L)\times k]} & [\underline{H}_{(n-L)}]_{[(n-L)\times(m-k)]} \end{array}\right] \tag{4.3}$$

o que resulta em duas partições distintas da matriz incidência $\underline{H}$*, ou seja, os primeiros k ramos do SEP não conectam nenhuma das últimas* $\mathbf{n}$*-L barras do mesmo, e os últimos* $\mathbf{m}$*-k ramos não conectam nenhuma das L primeiras barras do sistema, resultando assim em dois subsistemas disjuntos. Sendo esta conclusão uma contradição da hipótese inicial, o teorema está demonstrado.* □

É importante ressaltar que o teorema anterior fornece apenas uma condição necessária à conexidade do SEP, porém pode ser demonstrado que a mesma é também uma condição suficiente para a conexidade do sistema. A demonstração de tal fato pode ser facilmente encontrada em livros que tratam a teoria de grafos [54].

Teorema 4.2.3 (Matriz Incidência Barra-Ramo Fatorada $\underline{H}_F$)**.** *Considere um SEP composto por* $\mathbf{n}$ *barras e* $\mathbf{m} \geq (\mathbf{n}$*-1) ramos. Se este sistema é conexo, existe uma matriz* $\underline{C}$ *invertível, tal que* $\underline{H}_F = \underline{C}^{-1}\underline{H}$*, sobre o corpo módulo-2, onde* $\underline{H}$ *é a "matriz incidência barra-ramo" do SEP sob análise, e a "matriz incidência barra-ramo fatorada"* $\underline{H}_F$ *possui a seguinte forma:*

$$\underline{H}_F = \left[\begin{array}{c|c} [\underline{I}]_{[(n-1)\times(n-1)]} & [\underline{R}]_{\{(n-1)\times[m-(n-1)]\}} \\ \hline [\underline{0}]_{[1\times(n-1)]} & [\underline{0}]_{\{1\times[m-(n-1)]\}} \end{array}\right] \tag{4.4}$$

onde $\underline{I}$ *representa a matriz identidade e* $\underline{R}$ *a matriz de redundância dos ramos.*

Prova 4.2.3 (Prova do Teorema da Matriz Incidência Fatorada $\underline{H}_F$)**.** *Seja o SEP conexo, prova-se, utilizando os teoremas (4.2.1) e (4.2.2), que* $\underline{H}$ *tem posto* $\rho(H) = (\mathbf{n}-1)$ *[54], de forma que esta matriz possa ser rearranjada, com possíveis permutações de colunas, da seguinte maneira:*

$$\underline{H} = \left[\begin{array}{c|c} [\underline{A}]_{[(n-1)\times(n-1)]} & [\underline{D}]_{[(n-1)\times q]} \\ \hline [\underline{h}_A]_{[1\times(n-1)]} & [\underline{h}_D]_{(1\times q)} \end{array}\right] \tag{4.5}$$

onde $q = [\mathbf{m} - (\mathbf{n}-1)]$ *e* $\underline{A}$ *é uma matriz invertível.*

Logo, sendo $\rho(H) = (\mathbf{n}-1)$*, podemos escrever as q últimas colunas de H como uma combinação linear das (*$\mathbf{n}$*-1) primeiras:*

$$[\underline{D}]_{[(n-1)\times q]} = [\underline{A}]_{[(n-1)\times(n-1)]}[\underline{R}]_{[(n-1)\times q]} \tag{4.6}$$

$$[\underline{h}_D]_{(1\times q)} = [\underline{h}_A]_{[1\times(n-1)]}[\underline{R}]_{[(n-1)\times q]} \tag{4.7}$$

De (4.6) e (4.7), pode-se reescrever H da seguinte maneira:

$$\underline{H} = \left[\begin{array}{c|c} [\underline{A}] & [\underline{A}][\underline{R}] \\ \hline [\underline{h}_A] & [\underline{h}_A][\underline{R}] \end{array}\right] \tag{4.8}$$

Com isso, admitindo a existência de uma matriz $\underline{C}$ *invertível, tem-se que:*

$$\underline{H}_F = \underline{C}^{-1} \cdot \underline{H} \tag{4.9}$$

Definindo, então, a matriz de mudança de base $\underline{C}$ *como sendo:*

$$\underline{C} = \left[\begin{array}{c|c} [\underline{A}] & [\underline{0}] \\ \hline [\underline{h}_A] & 1 \end{array}\right] \tag{4.10}$$

Desde que $\underline{A}$ *seja invertível, pode-se calcular* $\underline{C}^{-1}$*:*

$$\underline{C}^{-1} = \left[\begin{array}{c|c} [\underline{A}]^{-1} & [\underline{0}] \\ \hline -[\underline{h}_A][\underline{A}]^{-1} & 1 \end{array}\right] \tag{4.11}$$

Substituindo (4.11) em (4.9), obtém-se:

$$\underline{H}_F = \left[\begin{array}{c|c} [\underline{A}]^{-1} & [\underline{0}] \\ \hline -[\underline{h}_A][\underline{A}]^{-1} & 1 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c|c} [\underline{A}] & [\underline{A}][\underline{R}] \\ \hline [\underline{h}_A] & [\underline{h}_A][\underline{R}] \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} [\underline{I}] & [\underline{R}] \\ \hline [\underline{0}] & [\underline{0}] \end{array}\right] \tag{4.12}$$

e o teorema está demonstrado. □

Deve-se fazer menção ao fato de que a fatoração da matriz incidência $\underline{H}$ conduz a forma $\underline{H}_F$ somente sobre o corpo módulo-2, ou seja, é necessário fazer uso das operações de adição (+) e multiplicação (·) definidas sobre este corpo na obtenção da forma fatorada da matriz incidência, $\underline{H}_F$, de modo que a prova anterior é válida somente sobre o corpo módulo-2.

Deste modo, a matriz $\underline{H}_F$ mostra ao longo de suas colunas as relações entre as barras e os ramos do SEP, de maneira a determinar todos os caminhos que conectam uma dada barra ao restante do sistema.

O próximo resultado indica como realizar a identificação de um ramo crítico para o SEP baseado na estrutura da "matriz incidência barra-ramo fatorada", $\underline{H}_F$.

Teorema 4.2.4 (Identificação de Ramos Críticos na Matriz $\underline{H}_F$)**.** *Considere um SEP composto por* $\mathbf{n}$ *barras e* $\mathbf{m} \geq (\mathbf{n}$*-1) ramos conexo e seja* $\underline{H}_F$ *a "matriz incidência barra ramo fatorada" na forma (4.4). Se o k-ésimo vetor linha que compõe a matriz* $\underline{H}_F$*, com k<*$\mathbf{n}$*, possui apenas um elemento diferente de zero, então o respectivo ramo, associado e este elemento, é um ramo crítico*

Prova 4.2.4 (Prova do Teorema de Identificação de Ramos Críticos na Matriz $\underline{H}_F$)**.** *A demonstração deste resultado é imediata uma vez que sendo o SEP conexo, o posto da matriz incidência* $\underline{H}$ *é igual a (*$\mathbf{n}$*-1), dos teoremas (4.2.1) e (4.2.2), e sendo a matriz* $\underline{H}_F$ *obtida através de combinações lineares dos vetores-linha de* $\underline{H}$ *tem-se que:* $\rho(\underline{H}_F) = \rho(\underline{H}) = \mathbf{n} - 1$.

Logo, se existe k<$\mathbf{n}$*, tal que o k-ésimo vetor-linha de* $\underline{H}_F$ *possui apenas um elemento não nulo, e o respectivo ramo associado a este elemento for retirado do sistema, segue-se que:* $\rho(\underline{H}_F^{(k)}) = n - 2 = \rho(\underline{H}^{(k)})$*. Ou seja, é possível demonstrar que existe um número*

$L<\mathbf{n}$, tal que a soma de L vetores-linha de $\underline{H}^{(k)}$ é um vetor nulo, e portanto segue, do teorema (4.2.2), que o sistema é uma reunião de dois subsistemas disjuntos, e o resultado está demonstrado. □

Baseado no teorema (4.2.4) e admitindo o SEP inicialmente conexo, a análise de ilhamento para o mesmo pode ser realizada do seguinte modo:

1. Constrói-se a "matriz incidência barra-ramo" $\underline{H}$, conforme a definição (4.2.1);
2. Obtém-se a matriz $\underline{H}_F$, a partir da fatoração da matriz incidência $\underline{H}$ sobre o corpo módulo-2;
3. Percorrem-se as linhas da matriz $\underline{H}_F$ de modo a determinar as que possuem um único elemento não nulo;
4. As colunas onde se posicionam os elementos não nulos anteriores indicam os ramos cuja eliminação causa o ilhamento do SEP;

Uma vez demonstrado o método proposto, utilizando a álgebra módulo-2, seria interessante realizar os mesmos passos para demonstrá-lo sobre o corpo dos números reais, pois tal demonstração é de importante interesse prático, uma vez que com este resultado as operações definidas sobre o corpo módulo-2 não necessariamente precisariam ser implementadas, ou seja, rotinas de fatoração já implementadas em *softwares* de análise de SEPs seriam facilmente reaproveitadas na análise de ilhamento.

Porém, é impossível utilizar a "matriz incidência barra-ramo" $\underline{H}$ na obtenção da forma fatorada $\underline{H}_F$ sobre o corpo dos números reais, utilizando as operações de adição e multiplicação usuais, uma vez que o posto de $\underline{H}$ nem sempre seria menor que $\mathbf{n}$, impossibilitando a demonstração dos teoremas (4.2.1), (4.2.3) e (4.2.3) de modo a inviabilizar a identificação do nível de redundância dos ramos do SEP e a respectiva identificação dos ramos críticos do sistema.

Considere, então, um SEP composto de 3 barras e 4 ramos, conforme apresentado na figura (4.3).

Desta forma, segundo a definição (4.2.1), a matriz incidência $\underline{H}$, para o SEP da figura (4.3), tem a seguinte forma:

$$\underline{\mathrm{H}}_{(SEP)} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 & L_4 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

É importante notar que a identificação dos ramos foi adicionada a matriz, na primeira linha da mesma, apenas para facilitar a identificação dos ramos críticos do SEP.

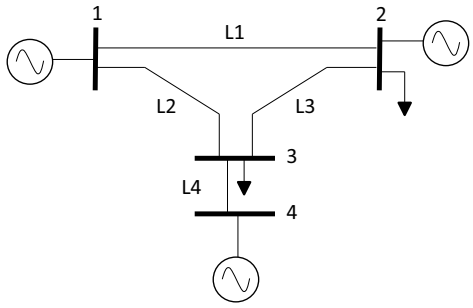

Figura 4.3: SEP composto de 3 barras e 4 ramos (exemplo para análise de ilhamento).

Desta maneira, observa-se facilmente que, sobre o corpo real $mathbbR^n$, $\rho(\underline{H}_{SEP}) = 4 = \mathbf{n}$, e portanto, não é possível obter a matriz incidência fatorada $\underline{H}_F$, na forma (4.4), utilizando as operações de adição e multiplicação usuais.

Deste modo, a fim de sobrepujar tal dificuldade, define-se a "matriz incidência barra-ramo orientada" $\underline{H}'$, de forma a garantir que a fatoração da mesma, utilizando a álgebra real convencional, conduza a uma "matriz incidência barra-ramo orientada fatorada" $\underline{H}'_F$ equivalente a definida em (4.4).

Definição 4.2.3 (Matriz incidência barra-ramo (pseudo-)orientada $\underline{H}'$)**.** *Definindo uma orientação arbitrária para todos os ramos componentes do sistema de transmissão do SEP sob análise, chama-se "matriz incidência barra-ramo (pseudo-)orientada", e denota-se por H', a matriz associada ao SEP cujos elementos são definidos pela relação:*

$$h'_{ij} = \left\{ \begin{array}{ll} 1\ (-1) & \textit{se o ramo "j" é incidente à barra "i" no ponto de} \\ & \textit{origem (terminal) deste ramo;} \\ 0 & \textit{caso contrário.} \end{array} \right\} \tag{4.14}$$

onde $i = 1, ..., \mathbf{n}$ e $j = 1, ..., \mathbf{m}$, sendo $\mathbf{n}$ e $\mathbf{m}$ respectivamente o número de barras e de ramos que compõem o SEP.

É importante ressaltar que a matriz incidência orientada $\underline{H}'$ é na verdade uma matriz pseudo-orientada, já que a orientação dos ramos no sistema de transmissão do SEP sob estudo pode ser tomada de forma totalmente arbitrária. Assim como mencionar também que cada coluna da matriz incidência $\underline{H}'$ possui exatamente dois elementos não nulos, assim como na matriz incidência $\underline{H}$, característica esta extensivamente explorada nas demonstrações dos teoremas desta seção.

Desta forma, uma vez definida a matriz incidência orientada H', pode-se facilmente demonstrar os teoremas (4.2.1) - (4.2.4), utilizando a álgebra convencional sobre o corpo real ($\mathbb{R}^n$), de modo a obter uma "matriz incidência barra-ramo orientada fatorada" H'_F, na forma de (4.4), e possibilitar a análise da redundância dos ramos componentes do sistema

de transmissão do SEP sob estudo, assim como a respectiva determinação de todos os ramos críticos do sistema de maneira análoga à demonstrada anteriormente.

Considerando, então, novamente o SEP apresentado na figura (4.3) e admitindo uma orientação arbitrária para os ramos do mesmo, constrói-se a matriz incidência orientada $\underline{H}'$:

$$\underline{\mathrm{H}}'_{(SEP)} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 & L_4 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

Nota-se, então, que agora $\rho(H'_{SEP}) = 3 = \mathbf{n} - 1$, na álgebra real usual, de modo que a matriz incidência orientada fatorada $\underline{H}'_F$ pode ser obtida, utilizando as operações de adição e multiplicação convencionais, na mesma forma de (4.4), da seguinte maneira:

$$H_F'^{(SEP)} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_4 & L_3 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

Com isso, através da aplicação do método proposto, verifica-se que $\{L_4\}$ é o único ramo crítico no SEP sob análise, quando da perda de um único equipamento (critério N-1).

Entre as principais vantagens deste novo método, para análise de ilhamento em SEPs, podem-se destacar as seguintes:

- *Facilidade de Implementação*: a maioria dos *softwares* utilizados para análise de SEPs, fazem uso de rotinas de fatoração, seja na resolução de fluxo de potência / estimador de estados / cálculo de curto-circuito etc, as quais podem facilmente ser aproveitadas na fatoração da matriz incidência $\underline{H}$, tornando, então, muito pequeno o esforço necessário para a implementação do método aqui proposto;

- *Identificação de todos os possíveis casos de ilhamento*: dada a topologia do SEP, apenas uma fatoração é necessária para determinar todos os possíveis casos de ilhamento considerando a perda de um único equipamento (critério N-1);

- *Velocidade de computação*: embora o método exija a construção da matriz incidência $\underline{H}$, a mesma é esparsa e portanto as técnicas de esparsidade para armazenamento e fatoração [60] são facilmente aplicadas, proporcionando desta maneira grande velocidade ao método;

- *Adaptabilidade em Tempo-Real*: sempre que uma alteração topológica ocorre no SEP a análise de ilhamento deve ser refeita para determinar as vulnerabilidades do sistema, porém a matriz incidência fatorada $\underline{H}_F$ pode ser atualizada, através de técnicas de refatoração parcial [64], de forma a possibilitar sua utilização em tempo-real.

Outra informação relevante é o fato de que o novo método proposto, neste trabalho, realiza a análise para a perda de um único ramo do sistema, uma vez que o presente trabalho se restringe ao critério (N-1) para perdas de equipamentos. Porém, tal análise pode ser facilmente estendida para a perda simultânea de k ramos, nos mesmos moldes da análise de redundância para conjuntos de medidas, proposta por London, Alberto e Bretas [41].

A fim de exemplificar a aplicação do método aqui proposto na análise de ilhamento em SEPs, este será aplicado na identificação de contingências críticas (separação física da rede de transmissão) no sistema sul brasileiro equivalente reduzido apresentado na figura (3.2).

Na tabela (4.1) estão apresentados os resultados da aplicação do filtro preliminar de detecção de ilhamento à análise de contingências no sistema sul brasileiro equivalente reduzido.

Tabela 4.1: Aplicação do filtro classificador para detecção de ilhamento no sistema sul brasileiro equivalente reduzido.

contingência entre as barras	ilhamento
343 - 344	—
343 - 382	—
343 - 391	—
344 - 431	—
366 - 386	♮♮[6]
367 - 368	—
367 - 396	—
367 - 437	—
368 - 370	—
368 - 399	—
369 - 370	♮♮
370 - 371	—
370 - 408	—
371 - 372	—
371 - 374	—

[6]Caso onde ocorre o ilhamento de um gerador síncrono conectado ao SEP.

contingência entre as barras	ilhamento
372 - 374	—
373 - 374	♮♮
374 - 375	—
374 - 433	—
375 - 376	—
375 - 382	—
376 - 377	—
377 - 378	—
377 - 383	—
378 - 379	—
379 - 380	—
379 - 385	—
380 - 396	—
381 - 382	♮♮
382 - 383	—
382 - 384	—
382 - 386	—
382 - 398	—
383 - 384	—
383 - 385	—
386 - 387	—
387 - 402	—
388 - 389	—
388 - 414	—
389 - 391	—
390 - 391	♮♮
391 - 398	—
392 - 393	♮♮
393 - 396	♮♮
394 - 396	♮♮
395 - 396	♮♮
396 - 437	—
397 - 398	♮♮
399 - 402	—
399 - 414	—
407 - 408	♮♮
408 - 414	—

contingência entre as barras	ilhamento
430 - 431	—
430 - 432	—
430 - 433	—
431 - 432	—
432 - 433	—

Verificando os dados fornecidos na tabela (4.1) pode-se concluir que o filtro preliminar para a detecção de ilhamento conseguiu identificar todas as ocorrências de ilhamento no SEP, considerando o critério (N-1) para perdas de equipamentos. Desta maneira, as contingências detectadas como causando ilhamento no sistema são classificadas como críticas neste trabalho, uma vez que impedem a redistribuição de carga no sistema e diminuem as margens de segurança do mesmo.

4.2.2 Filtro Preliminar para Detecção de Pontos de Equilíbrio Assintóticamente Estáveis no SEP pós-falta [22], [23]

O segundo filtro classificador preliminar que compõe a ferramenta de análise de segurança dinâmica proposta neste trabalho é um filtro para detecção do a.s.e.p. do sistema pós-falta. A prévia determinação do a.s.e.p. pós-falta é essencial para a análise de estabilidade transitória, uma vez que caso o mesmo não exista ou esteja distante das condições operacionais do período pré-falta, o SEP pós-falta será instável na quase totalidade dos casos práticos[7].

Este segundo filtro preliminar é baseado na aplicação do método de Newton-Raphson [9] ao sistema (3.18) no período pós-falta, tomando como condição inicial o a.s.e.p. da configuração pré-falta. Caso o método venha a divergir e/ou a não convergir, a contingência sob análise é classificado como portadora de um problema na identificação do a.s.e.p. pós-falta, o que pode ser um indicativo da inexistência de um a.s.e.p. para a configuração do SEP pós-falta [22], [23].

Desta forma, caso o filtro não consiga identificar o a.s.e.p. do sistema pós-falta para o caso sob análise, este é enviado diretamente para o filtro complementar de simulação computacional, no domínio do tempo, o qual irá concluir sobre a estabilidade do sistema pós-falta, evitando assim que análises desnecessárias sejam realizadas.

Na tabela (4.2) estão apresentados os resultados obtidos da aplicação do filtro preliminar de detecção de pontos de equilíbrio assintóticamente estáveis, da configuração pós-falta do SEP, à análise de contingências no sistema sul brasileiro equivalente reduzido.

[7]Existem poucos casos onde a existência de um ciclo limite estável no sistema pós-falta faz com que o mesmo seja estável na ausência de um a.s.e.p., bem como condições muito particulares de carregamento que permitam que um a.s.e.p. pós-falta distante do ponto de operação pré-falta seja atingido sem a violação de limites operacionais.

Tabela 4.2: Aplicação do filtro classificador para detecção do a.s.e.p. pós-falta no sistema sul brasileiro equivalente reduzido.

contingência entre as barras	a.s.e.p. detectado
343 - 344	✓[8]
343 - 382	✓
343 - 391	✓
344 - 431	✓
366 - 386	✓
367 - 368	✓
367 - 396	✓
367 - 437	✓
368 - 370	✓
368 - 399	✓
369 - 370	✓
370 - 371	✓
370 - 408	✓
371 - 372	✓
371 - 374	✓
372 - 374	✓
373 - 374	✓
374 - 375	✓
374 - 433	✓
375 - 376	✓
375 - 382	✓
376 - 377	✓
377 - 378	✓
377 - 383	✓
378 - 379	✓
379 - 380	✓
379 - 385	✓
380 - 396	✓
381 - 382	✓
382 - 383	✓
382 - 384	✓
382 - 386	✓
382 - 398	✓

[8]Caso onde o a.s.e.p. da configuração pós-falta foi detectado pelo método de Newton-Raphson.

contingência entre as barras	a.s.e.p. detectado
383 - 384	✓
383 - 385	✓
386 - 387	✓
387 - 402	✓
388 - 389	✓
388 - 414	✓
389 - 391	✓
390 - 391	✓
391 - 398	✓
392 - 393	✓
393 - 396	✓
394 - 396	✓
395 - 396	✓
396 - 437	✓
397 - 398	✓
399 - 402	✓
399 - 414	✓
407 - 408	✓
408 - 414	✓
430 - 431	✓
430 - 432	✓
430 - 433	✓
431 - 432	✓
432 - 433	✓

Observa-se na tabela (4.2) que o a.s.e.p. da configuração pós-falta foi encontrado para todas as contingências analisadas, o que verifica a robustez e eficiência da aplicação do método de Newton-Raphson na identificação do mesmo. Contudo, deve-se mencionar que é possível produzir casos onde um a.s.e.p. pós-falta não seja identificado, tomando como condição inicial o a.s.e.p. pré-falta, pelo método de Newton-Raphson, realizando o aumento da carga deste sistema e conseqüentemente tornando as soluções pré e pós-falta suficientemente distantes para provocar a divergência do método.

É importante ressaltar que, embora, para o SEP sob estudo, nenhuma das contingências tenha sido classificada como possuindo um problema na identificação a.s.e.p. pós-falta, tais casos seriam enviados diretamente para a simulação, no domínio do tempo, do sistema, evitando assim que análises desnecessárias sejam realizadas e aumentando a velocidade de execução da ferramenta proposta.

4.2.3 Filtros Classificadores BCU

O projeto dos classificadores BCU, utilizados na composição da ferramenta de análise de segurança dinâmica proposta neste trabalho, está baseado nos passos que compõem o próprio método BCU. Estes classificadores, assim como os classificadores preliminares, têm por objetivo atingir os requisitos de confiabilidade, eficiência, velocidade, robustez e adaptabilidade em tempo real propostos neste trabalho.

Para tanto, os classificadores tem por principal objetivo determinar, com o menor esforço computacional possível, quais dentre as contingências sob análise são casos altamente estáveis, ou seja, não conduzem o SEP a um colapso e quais são casos críticos ao mesmo, evitando desta forma que análises desnecessárias sejam realizadas e acelerando o processo de classificação.

O método BCU possui três tarefas de grande esforço computacional: o cálculo do *exit point*, do m.g.p. e do c.u.e.p.. Assim, os classificadores BCU, visam determinar, em cada um desses passos, padrões que possam ser utilizados para identificar, o quanto antes, casos altamente estáveis ou casos onde a exatidão destes cálculos seja denegrida.

As contingências classificadas como casos altamente estáveis são descartadas do processo de classificação e aquelas classificadas como casos incertos ou instáveis são enviados ao filtro complementar de simulação, no domínio do tempo, para uma última e refinada análise. Deve-se ressaltar que as contingências classificadas como casos instáveis pelos classificadores também são enviadas para uma análise posterior, no domínio do tempo, uma vez que os resultados fornecidos pelos mesmos são sempre conservadores[9], característica essa herdada do método em que se baseiam.

Outra importante característica dos filtros classificadores é o fato de que os mesmos não se restringem à análise de estabilidade transitória ao primeiro *swing*, tornando-os aptos à aplicação na análise de segurança dinâmica de SEPs.

Filtro Classificador BCU 1 [22], [23]:

O primeiro filtro classificador BCU utilizado neste trabalho visa complementar o filtro preliminar para identificação do a.s.e.p. na configuração pós-falta do SEP. Esta complementação é baseada nas seguintes hipóteses, necessárias à aplicação dos métodos diretos à análise de estabilidade transitória utilizados neste trabalho: (i) existe um ponto de equilíbrio assintóticamente estável no sistema pós-falta, (ii) o a.s.e.p. pós-falta está suficientemente próximo do a.s.e.p. pré-falta, a fim de possibilitar a sua identificação pelo método de Newton-Raphson, e (iii) o a.s.e.p. pré-falta está dentro da região de estabilidade do a.s.e.p. pós-falta.

Este filtro tem por objetivo identificar casos potencialmente instáveis, uma vez que a

[9] As hipóteses, utilizadas na dedução do método BCU, garantem o conservadorismo das estimativas fornecidas desde que satisfeitas.

região de estabilidade do a.s.e.p. pós-falta pode ser muito pequena, ou em casos extremos até inexistente. Neste filtro dois índices serão utilizados a fim de complementar o filtro preliminar para identificação do a.s.e.p. pós-falta:

- δ_{dif}: maior diferença entre os ângulos calculados do a.s.e.p. pós-falta;
- $D_{a.s.e.p.}$: distância angular entre os a.s.e.p.s pré e pós-falta.

O primeiro índice deste classificador tem a finalidade de identificar se o método de Newton-Raphson encontrou um u.e.p. ao invés do a.s.e.p. para o sistema pós-falta, uma vez que um ponto de equilíbrio instável normalmente apresenta um valor maior que 90° para a maior diferença entre seus ângulos. O segundo índice visa determinar se o a.s.e.p. pré-falta está próximo o suficiente do a.s.e.p. identificado no pós-falta, de forma a garantir que o primeiro esteja dentro da região de estabilidade do último.

Assim, se algum dos índices anteriores é maior que um limite pré-selecionado[10], o caso sob análise é enviado diretamente para a simulação, no domínio do tempo, onde uma análise apurada da estabilidade do SEP é realizada.

Os elementos utilizados nas análises anteriormente expostas pelo filtro classificador BCU 1 são apresentados na figura (4.4).

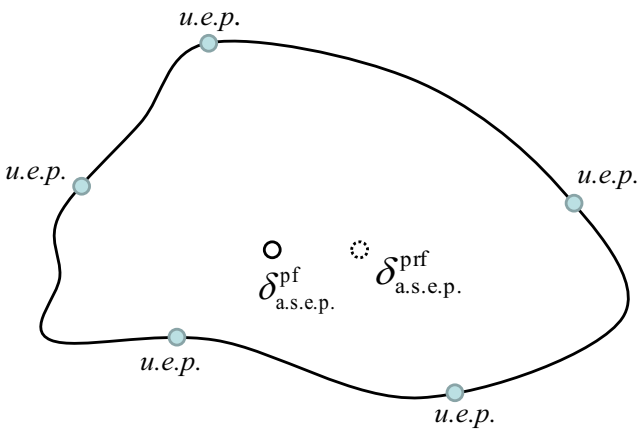

Figura 4.4: Filtro Classificador BCU 1.

Filtro Classificador BCU 2 [22], [23]:

O segundo filtro classificador BCU tem por finalidade identificar contingências amenas (casos altamente estáveis) ao SEP sob análise. Em outras palavras, contingências cujo

[10]Os valores limites utilizados pelos filtros classificadores BCU são determinados a priori (tarefa *off-line*) de sua entrada em operação através do estudo de alguns poucos casos para o SEP sob análise. Verifica-se que tais limites apresentam grande robustez quando da variação da topologia e do ponto de operação do sistema, porém, uma metodologia eficiente para a correta determinação (e ajuste) destes valores em tempo real ainda é objeto de pesquisa por parte do autor e do orientador deste trabalho.

tempo crítico de abertura seja muito grande quando comparado aos tempos de atuação do sistema de proteção.

Tal característica pode ser observada durante a detecção do *exit point* (PEBS), no primeiro passo do método BCU, uma vez que casos altamente estáveis devem apresentar uma região de estabilidade, do a.s.e.p. pós-falta, muito maior do que casos instáveis. Desta forma, ao realizar a busca pelo PEBS, ao longo da trajetória do sistema sob falta, este é alcançado para tempos muito superiores aos da proteção do sistema.

Neste filtro dois índices são utilizados para a identificação deste tipo de caso:

- T_{exit}: intervalo de tempo de simulação do sistema em falta;
- V_{exit}: diferença de energia potencial entre o *exit point* e o a.s.e.p. do sistema pré-falta.

O primeiro destes índices é responsável por mensurar o "tamanho" da região de estabilidade do a.s.e.p. pós-falta, uma vez que, por hipótese, a trajetória em falta do SEP afasta o mesmo do a.s.e.p. pós-falta, espera-se que se o tempo para cruzar o PEBS for alto a região de estabilidade seja "grande". O segundo índice é responsável por determinar se existe a possibilidade da ocorrência de instabilidade durante os *swings* subseqüentes ao primeiro no período pós-falta, uma vez que, se a energia potencial armazenada durante a falta for muito grande, existe a possibilidade de que ocorram instabilidades em *swings* subseqüentes ao primeiro.

Desta maneira, as contingências que apresentarem um valor para T_{exit} maior que o limite pré-especificado para o primeiro índice e também um valor para V_{exit} menor que o limite pré-selecionado para o segundo, serão classificadas como casos altamente estáveis por este filtro. Tais casos não requerem mais nenhuma análise complementar e portanto são eliminadas do processo de classificação, diminuindo assim o esforço computacional requerido na análise de segurança dinâmica.

Os elementos utilizados nas análises anteriormente expostas pelo filtro classificador BCU 2 são apresentados na figura (4.5).

Filtro Classificador BCU 3:

Este novo filtro classificador BCU é proposto neste trabalho e tem por objetivo principal distinguir a ocorrência de um *swing* estável durante o período em que o SEP encontra-se sob a ação da falta, uma vez que a ocorrência do mesmo é erroneamente identificada como o cruzamento do PEBS, no primeiro passo do método BCU, conduzindo assim ao cálculo errôneo do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15).

Embora se pressuponha que o SEP, no período em falta, se afaste continuamente do a.s.e.p. pós-falta ao longo de uma trajetória instável, podem existir casos onde, num primeiro momento, a energia cinética ganha pelos rotores das máquinas conectadas ao

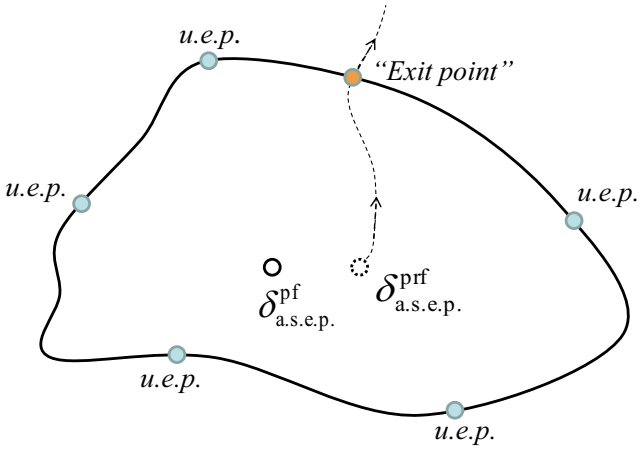

Figura 4.5: Filtro Classificador BCU 2.

sistema, proveniente da ação da contingência sobre o SEP, não seja suficiente para acelerar continuamente as máquinas, causando assim a ocorrência de um *swing* estável (onde também é possível verificar um máximo de energia potencial) durante o período em que o sistema se apresenta sob falta. Em tais casos é de vital importância diferenciar a ocorrência de um *swing* estável do cruzamento do PEBS e impedir que estimativas errôneas sejam obtidas.

Este filtro classificador utiliza um único índice para realizar a classificação deste tipo de caso:

- V_{p1}: diferença de energia potencial entre o máximo de $V_p(\underline{\delta})$, após o primeiro ciclo do algoritmo *Shadowing Method*, e o *exit point*.

Este índice tem por finalidade diferenciar imprecisões numéricas na detecção do PEBS, provenientes dos cálculos realizados por computador (rotinas de integração), da ocorrência de um *swing* estável do sistema durante o período em falta.

É importante observar que se a diferença de energia potencial entre a primeira aproximação da fronteira de estabilidade, obtida pelo algoritmo *Shadowing Method*, e o *exit point* é maior que um limite pré-selecionado e ainda o intervalo de tempo para a detecção do PEBS é maior que o tempo de abertura t_{ab} para a contingência sob análise, então este caso é classificado como altamente estável.

Caso o máximo da energia potencial tenha sido detectado, ao longo da trajetória em falta projetada do sistema gradiente reduzido (3.15), em um intervalo de tempo menor que t_{ab}, é necessário prosseguir com a simulação do SEP em falta até este instante e então:

1. Se, entre os instantes de detecção do PEBS e t_{ab}, a energia potencial do sistema não encontrou um segundo máximo, então a contingência é classificada como um caso altamente estável;

2. Caso um segundo máximo de energia potencial tenha sido encontrado, define-se um novo *exit point* e aplica-se novamente o classificador para um novo ciclo do algoritmo *Shadowing Method*.

As contingências classificadas como casos altamente estáveis por este filtro não necessitam de nenhuma análise complementar e são retiradas do processo de classificação, o que resulta na economia de cálculos e agiliza a análise de segurança dinâmica.

Os elementos utilizados nas análises anteriormente expostas pelo filtro classificador BCU 3 são apresentados na figura (4.6).

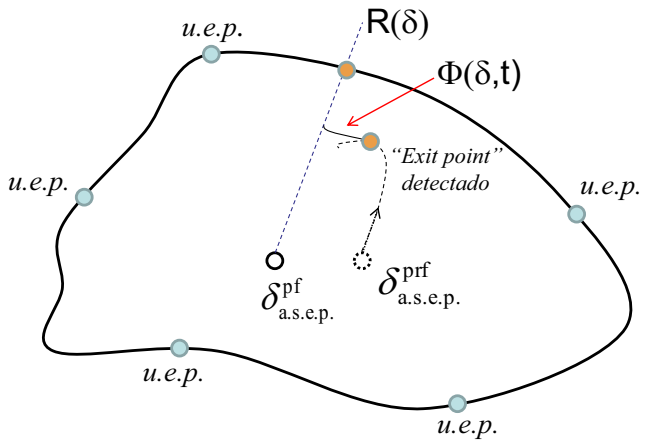

Figura 4.6: Filtro Classificador BCU 3.

Filtro Classificador BCU 4 [22], [23]:

O quarto filtro classificador BCU visa identificar a ocorrência de um possível erro na busca pelo m.g.p., no segundo passo do método BCU, uma vez que dois são os principais problemas na identificação do mesmo: (i) não existe um ponto de mínimo gradiente na simulação da trajetória do sistema gradiente reduzido pós-falta (3.15) e (ii) o ponto de mínimo gradiente encontrado está muito próximo a um u.e.p. de tipo k > 1, fazendo com que o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15) seja calculado erroneamente.

Com tal intuito, este filtro utiliza o seguinte índice na classificação de contingências que possam vir a apresentar um erro na identificação do m.g.p.:

- V_{p2}: diferença de energia potencial entre o *exit point* e o a.s.e.p. pré-falta.

Este índice objetiva a detecção de contingências onde o *exit point* possui uma energia muito alta quando comparada a do a.s.e.p. pré-falta, uma vez que a observação de inúmeros casos mostra que em tal situação o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15) geralmente se apresenta distante do m.g.p. identificado no segundo passo do método BCU, conduzindo então a um dos dois possíveis problemas expostos anteriormente nesta seção.

Os casos que apresentam um valor para V_{p2} maior que o limite pré-estipulado são identificados como possíveis portadores de erro na identificação do m.g.p. sendo, então, classificados como incertos e enviados diretamente para o filtro complementar de simulação, no domínio do tempo, para uma análise mais apurada da estabilidade do SEP pós-falta.

Os elementos utilizados nas análises anteriormente expostas pelo filtro classificador BCU 4 são apresentados na figura (4.7).

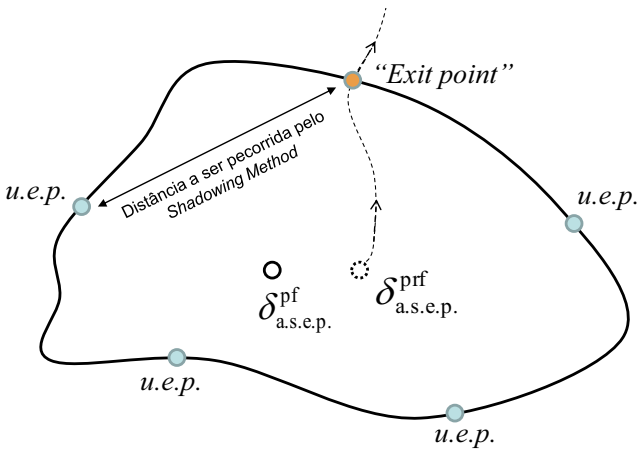

Figura 4.7: Filtro Classificador BCU 4.

Filtro Classificador BCU 5 [22]:

O quinto filtro classificador BCU, baseado também no segundo passo do método BCU, é responsável por identificar falhas durante a busca pelo m.g.p. do sistema gradiente reduzido (3.15) através do uso do algoritmo *Shadowing Method*.

Este filtro é dividido em três etapas distintas, cada uma das quais é responsável pela identificação de uma possível falha na obtenção do m.g.p.:

1. Primeiramente, em cada ciclo do algoritmo *Shadowing Method*, o filtro verifica se o máximo de energia potencial sobre o conjunto $R(\underline{\delta}_i)$ foi identificado para um $\alpha \in (0, \alpha_{max})$, onde:

   - α_{max}: limite pré-selecionado para a distância a ser percorrida sobre o conjunto $R(\underline{\delta}_i)$ durante a busca pelo máximo de energia potencial (PEBS) sobre o mesmo;

2. No final dos ciclos do algoritmo *Shadowing Method*, o classificador verifica se uma aproximação para o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15) foi obtida, através do uso do algoritmo *Shadowing Method*, dentro de N_{shadow} iterações, onde:

- N_{shadow}: limite pré-estipulado para o número de ciclos do algoritmo *Shadowing Method* utilizados na aproximação do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15);

3. Por fim, o filtro classificador verifica se o m.g.p. encontrado possui uma energia potencial menor do que a energia potencial do *exit point*.

Desta maneira, as contingências identificadas, em qualquer uma das três etapas anteriores, como sendo portadoras de alguma falha na identificação do m.g.p., ou seja, não foi possível determinar o máximo de energia potencial sobre o conjunto $R(\underline{\delta}_i)$, ou não foi possível identificar uma aproximação para o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15) dentro do número de ciclos esperado ou o ponto de mínimo gradiente identificado possui uma energia potencial maior que a energia potencial do *exit point*, são classificadas como casos incertos. Tais casos são enviados diretamente para o filtro de simulação, no domínio do tempo, para uma análise mais apurada e respectiva determinação de estabilidade.

Os elementos utilizados nas análises anteriormente expostas pelo filtro classificador BCU 5 são apresentados na figura (4.8).

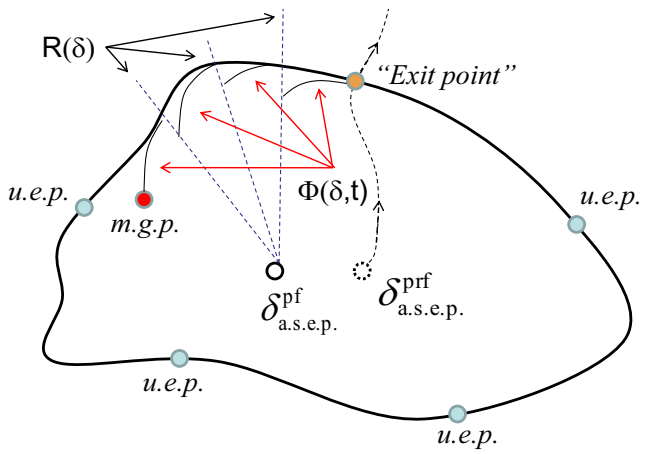

Figura 4.8: Filtro Classificador BCU 5.

Filtro Classificador BCU 6 [23]:

O sexto filtro classificador BCU tem como objetivo primordial evitar o cálculo do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15) para casos estáveis, baseado em informações dinâmicas do ponto de mínimo gradiente obtido no segundo passo do método BCU.

Este classificador utiliza conjuntamente 3 índices para realizar a classificação das contingências em casos estáveis:

- V_{p3}: diferença de energia potencial entre o m.g.p. e o ponto de eliminação da falta (ou em inglês *fault clearing point*);

- F_{max}: valor da norma $||f_i(\underline{\delta})||$, onde $f_i(\underline{\delta})$ é dada por (3.15).

- V_{norm}: margem de energia normalizada, definida como a diferença de energia potencial entre o m.g.p. e o ponto de eliminação da falta dividida pelo total de energia cinética ganha pelo sistema durante o período em falta;

O primeiro e o segundos destes índices visam identificar se o m.g.p. está suficientemente próximo ao c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15), de modo que a energia potencial no primeiro pode ser considerada uma aproximação desta no segundo. Dessa forma, se a diferença de energia potencial entre o m.g.p. e o ponto de eliminação da falta é suficientemente pequena, quando comparado a um valor limite pré-estabelecido, uma vez que para casos onde a tal diferença é muito grande, geralmente constata-se que o c.u.e.p. se encontra distante do m.g.p., e se o valor da norma $||f_i(\underline{\delta})||$ no m.g.p. é suficientemente pequeno, dado um valor limite pré-definido, então a energia potencial no c.u.e.p. pode ser aproximada pela energia potencial no m.g.p..

O terceiro índice visa determinar uma margem de energia máxima para casos onde o sistema pós-falta se apresenta estável de forma que, se a diferença de energia potencial entre o m.g.p. (considerado uma aproximação do c.u.e.p. se F_{max} é menor que um valor limite pré-estipulado) e o ponto de eliminação da falta é suficientemente maior que a energia cinética, ganha pelo SEP durante o período em falta, multiplicado por um valor limite pré-especificado, então a contingência é classificada como um caso altamente estável e, portanto, nenhuma análise complementar é requerida, eliminando assim a necessidade do cálculo do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15) e aumentando a rapidez da análise de segurança dinâmica.

Os elementos utilizados nas análises anteriormente expostas pelo filtro classificador BCU 6 são apresentados na figura (4.9).

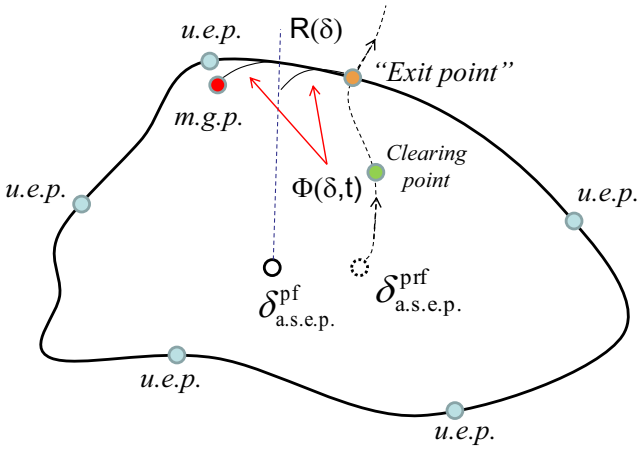

Figura 4.9: Filtro Classificador BCU 6.

Filtro Classificador BCU 7 [22], [23]:

O sétimo filtro classificador BCU visa identificar falhas durante o processo de cálculo do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15), no terceiro passo do método BCU.

Este classificador utiliza dois índices para verificar a ocorrência de um possível erro no cálculo do c.u.e.p.:

- $N_{c.u.e.p.}$: número de iterações para que o método de Newton-Raphson identifique o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15);
- $D_{c.u.e.p.}$: distância angular entre o c.u.e.p. calculado e o ponto de mínimo gradiente.

Desta maneira, o primeiro índice é responsável por detectar casos onde o método de Newton-Raphson não foi capaz de identificar o c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15), enquanto o segundo tem a finalidade de identificar casos onde existe a possibilidade de identificação errônea do c.u.e.p. do sistema gradiente reduzido (3.15).

As contingências identificadas por este filtro como possuindo um possível erro na identificação do c.u.e.p. são enviadas diretamente ao filtro complementar de simulação, no domínio do tempo, para a respectiva determinação da estabilidade do SEP pós-falta.

Os elementos utilizados nas análises anteriormente expostas pelo filtro classificador BCU 7 são apresentados na figura (4.10).

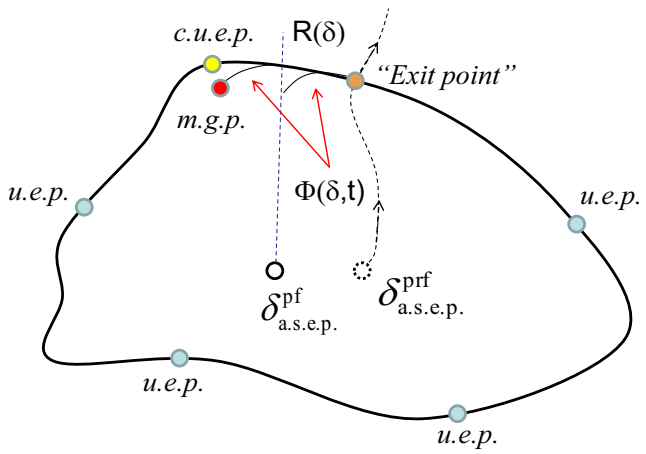

Figura 4.10: Filtro Classificador BCU 7.

Filtro Classificador BCU 8 [22], [23]:

O último filtro classificador BCU tem por finalidade identificar casos estáveis, tomando como energia crítica a energia potencial do c.u.e.p. do sistema original (3.13), obtido a partir gradiente reduzido (3.15) no quarto passo do método BCU.

As contingências classificadas como casos estáveis, ou seja, aquelas cuja energia total do SEP no instante de eliminação da falta é menor que a energia potencial do c.u.e.p.,

são definitivamente estáveis e nenhuma análise posterior será requerida, dada o caráter conservador do método BCU.

Os casos classificados como instáveis (na verdade incertos devido ao caráter conservador do método BCU) por este filtro são enviados para o filtro de simulação, no domínio do tempo, para análise e posterior determinação da estabilidade.

Os elementos utilizados nas análises anteriormente expostas pelo filtro classificador BCU 8 são apresentados na figura (4.11).

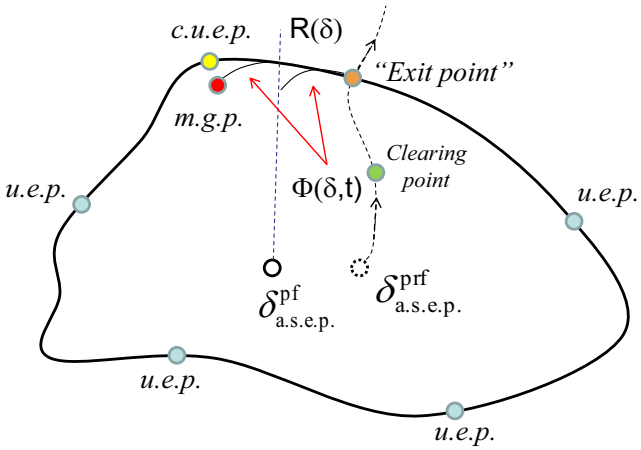

Figura 4.11: Filtro Classificador BCU 8.

4.2.4 Filtro Complementar de Simulação no Domínio do Tempo

O último filtro que compõe a ferramenta de análise de segurança dinâmica proposta neste trabalho é um filtro complementar para simulação computacional, no domínio do tempo, do SEP sob análise.

Este filtro é a última análise a ser requerida na análise de segurança dinâmica, uma vez que o sistema de equações diferenciais que descreve o modelo reduzido do SEP (3.18) é de elevada ordem e complexo, requerendo um passo de integração numérico de ordem muito pequena (tipicamente 1.10^{-3} ms) para capturar os transitórios do sistema, o que acaba por tornar a análise computacionalmente dispendiosa e lenta.

Desta maneira, apenas as contingências classificadas como casos incertos (potencialmente instáveis) são avaliadas por este último classificador, compondo ao final do processo a lista de contingências críticas ao sistema sob análise. É importante mencionar que, em um SEP bem planejado e projetado, o número de casos estáveis é muito maior que o número de casos instáveis, fazendo com que a análise no domínio do tempo seja requerida em uma pequena quantidade de casos.

Na próxima seção deste trabalho, a ferramenta para análise de segurança dinâmica aqui proposta será utilizada na análise de segurança do sistema sul brasileiro equivalente reduzido, a fim de demonstrar a aplicabilidade e exatidão da mesma.

4.2.5 Exemplo: Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido

Nesta seção a ferramenta para análise de segurança dinâmica de SEPs, baseada em métodos diretos, será aplicada à análise de segurança do sistema sul brasileiro equivalente reduzido.

Neste SEP serão estudadas um total de 114 contingências, constituídas de um curto-circuito trifásico franco aplicado em uma das extremidades de cada ramo (linha de transmissão / transformador) do sistema. O tempo de atuação do sistema de proteção, ou tempo de abertura t_{ab}, associado aos ramos sob falta será tomado como sendo igual a 350 ms, de forma a aumentar o número de contingências críticas para o sistema sob análise e possibilitar uma maior ilustração dos resultados obtidos pela ferramenta de análise de segurança dinâmica desenvolvida neste trabalho.

Os valores limites para cada um dos filtros de classificação foram determinados a partir da experiência do autor e da análise de alguns poucos casos para o SEP sob estudo, de forma a obter os seguintes resultados: $\boldsymbol{\delta}_{\mathbf{dif}} = 90°$, $\mathbf{D}_{\mathbf{a.s.e.p.}} = 30°$, $\mathbf{T}_{\mathbf{exit}} = 1s$, $\mathbf{V}_{\mathbf{exit}} = 40$, $\mathbf{V}_{\mathbf{p1}} = 0.5$, $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{max}} = 3$, $\mathbf{N}_{\mathbf{shadow}} = 160$, $\mathbf{V}_{\mathbf{p2}} = 80$, $\mathbf{V}_{\mathbf{p3}} = 80$, $\mathbf{V}_{\mathbf{norm}} = 1.1$, $\mathbf{F}_{\mathbf{max}} = 0.1$, $\mathbf{N}_{\mathbf{c.u.e.p.}} = 30$ e $\mathbf{D}_{\mathbf{c.u.e.p.}} = 5°$.

Na tabela (4.3) estão mostrados, para cada contingência analisada, os filtros classificadores responsáveis por identificar cada um casos presentes na lista de contingências, definida pelo operador do sistema, para a aplicação da ferramenta, proposta neste trabalho, na análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, do sistema sul brasileiro equivalente reduzido.

Tabela 4.3: Filtros classificadores responsáveis pela identificação de cada um dos casos de contingência definidos para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido.

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	classificador
343 - 344	343	>1.0s	BCU 3
343 - 344	344	>1.0s	BCU 3
343 - 382	343	>1.0s	BCU 3
343 - 382	382	0.390s	BCU 7
343 - 391	343	>1.0s	BCU 3
343 - 391	391	0.366s	BCU 7
344 - 431	344	>1.0s	BCU 3
344 - 431	431	>1.0s	BCU 3
366 - 386	—	ilhamento	preliminar 1
367 - 368	367	0.402s	BCU 5
367 - 368	368	>1.0s	BCU 5
367 - 396	367	0.403s	BCU 5

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	classificador
367 - 396	396	0.246s	BCU 5
367 - 437	367	0.409s	BCU 5
367 - 437	437	0.454s	BCU 5
368 - 370	368	>1.0s	BCU 5
368 - 370	370	0.346s	BCU 8
368 - 399	368	>1.0s	BCU 5
368 - 399	399	>1.0s	BCU 3
369 - 370	—	ilhamento	preliminar 1
370 - 371	370	0.307s	BCU 8
370 - 371	371	>1.0s	BCU 3
370 - 408	370	0.323s	BCU 8
370 - 408	408	0.207s	BCU 8
371 - 372	371	>1.0s	BCU 3
371 - 372	372	>1.0s	BCU 2
371 - 374	371	>1.0s	BCU 3
371 - 374	374	0.187s	BCU 5
372 - 374	372	>1.0s	BCU 2
372 - 374	374	0.187s	BCU 5
373 - 374	—	ilhamento	preliminar 1
374 - 375	374	0.158s	BCU 8
374 - 375	375	>1.0s	BCU 3
374 - 433	374	0.157s	BCU 8
374 - 433	433	>1.0s	BCU 3
375 - 376	375	>1.0s	BCU 3
375 - 376	376	>1.0s	BCU 5
375 - 382	375	>1.0s	BCU 5
375 - 382	382	0.345s	BCU 7
376 - 377	376	>1.0s	BCU 5
376 - 377	377	>1.0s	BCU 3
377 - 378	377	>1.0s	BCU 3
377 - 378	378	>1.0s	BCU 3
377 - 383	377	>1.0s	BCU 3
377 - 383	383	>1.0s	BCU 3
378 - 379	378	>1.0s	BCU 3
378 - 379	379	>1.0s	BCU 3
379 - 380	379	>1.0s	BCU 3
379 - 380	380	0.399s	BCU 8

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	classificador
379 - 385	379	>1.0s	BCU 3
379 - 385	385	>1.0s	BCU 3
380 - 396	380	0.378s	BCU 8
380 - 396	396	0.170s	BCU 8
381 - 382	—	ilhamento	preliminar 1
382 - 383	382	0.401s	BCU 7
382 - 383	383	>1.0s	BCU 3
382 - 384	382	0.402s	BCU 7
382 - 384	384	>1.0s	BCU 3
382 - 386	382	0.367s	BCU 7
382 - 386	386	0.393s	BCU 8
382 - 398	382	0.397s	BCU 7
382 - 398	398	0.334s	BCU 7
383 - 384	383	>1.0s	BCU 3
383 - 384	384	>1.0s	BCU 3
383 - 385	383	>1.0s	BCU 3
383 - 385	385	>1.0s	BCU 3
386 - 387	386	0.548s	BCU 8
386 - 387	387	>1.0s	BCU 3
387 - 402	387	>1.0s	BCU 3
387 - 402	402	>1.0s	BCU 3
388 - 389	388	>1.0s	BCU 3
388 - 389	389	>1.0s	BCU 3
388 - 414	388	>1.0s	BCU 3
388 - 414	414	>1.0s	BCU 3
389 - 391	389	>1.0s	BCU 3
389 - 391	391	0.356s	BCU 8
390 - 391	—	ilhamento	preliminar 1
391 - 398	391	0.289s	BCU 8
391 - 398	398	0.376s	BCU 5
392 - 393	—	ilhamento	preliminar 1
393 - 396	—	ilhamento	preliminar 1
394 - 396	—	ilhamento	preliminar 1
395 - 396	—	ilhamento	preliminar 1
396 - 437	396	0.249s	BCU 5
396 - 437	437	0.452s	BCU 5
397 - 398	—	ilhamento	preliminar 1

contingência entre as barras	barra em curto-circuito	$\hat{t}_{cr}$ (clássico)	classificador
399 - 402	399	>1.0s	BCU 3
399 - 402	402	>1.0s	BCU 3
399 - 414	399	>1.0s	BCU 3
399 - 414	414	>1.0s	BCU 3
407 - 408	—	ilhamento	preliminar 1
408 - 414	408	0.186s	BCU 8
408 - 414	414	>1.0s	BCU 5
430 - 431	430	>1.0s	BCU 5
430 - 431	431	>1.0s	BCU 3
430 - 432	430	>1.0s	BCU 5
430 - 432	432	>1.0s	BCU 5
430 - 433	430	>1.0s	BCU 5
430 - 433	433	>1.0s	BCU 3
431 - 432	431	>1.0s	BCU 3
431 - 432	432	>1.0s	BCU 5
432 - 433	432	>1.0s	BCU 5
432 - 433	433	>1.0s	BCU 3

Na tabela (4.4) estão apresentados os resultados obtidos por cada um dos filtros que compõem a ferramenta de análise proposta. Como forma de comparação e ratificação dos resultados obtidos anteriormente, apresenta-se, na tabela (4.5), os resultados obtidos para a análise de estabilidade transitória de todos os casos, presentes na lista de contingências, através da simulação, no domínio do tempo, do SEP sob estudo.

Tabela 4.4: Aplicação da ferramenta de avaliação de segurança dinâmica ao sistema sul brasileiro equivalente reduzido.

Filtro Classificador	Casos Analisados	Casos Estáveis	Casos Incertos	Casos Críticos
I (ilhamento)	114	×[11]	×	22
II (ident. a.s.e.p.)	92	×	0	×
III (BCU 1)	92	×	0	×
IV (BCU 2)	92	2	×	×
V (BCU 3)	90	45	×	×
VI (BCU 4)	45	×	0	×
VII (BCU 5)	45	×	23	×

[11] O símbolo (×) será utilizado, neste trabalho, para indicar quando uma determinada classificação não é realizada pelo filtro classificador especificado, ou seja, quando uma determinada informação não pode ser obtida pela aplicação deste filtro.

Filtro Classificador	Casos Analisados	Casos Estáveis	Casos Incertos	Casos Críticos
VIII (BCU 6)	22	0	×	×
XI (BCU 7)	22	×	8	×
X (BCU 8)	14	4	10	×

Tabela 4.5: Comparação dos resultados obtidos pela ferramenta de avaliação de segurança dinâmica, aplicada ao sistema sul brasileiro equivalente reduzido, com as simulações no domínio do tempo.

Filtro Classificador	Casos Estáveis	Casos Incertos	Casos Críticos	Casos Estáveis (SIMULAÇÃO)	Casos Instáveis (SIMULAÇÃO)
I (ilhamento)	—	—	22	—	—
II (ident. a.s.e.p.)	×	0	×	0	0
III (BCU 1)	×	0	×	0	0
IV (BCU 2)	2	×	×	2	0
V (BCU 3)	45	×	×	45	0
VI (BCU 4)	×	0	×	0	0
VII (BCU 5)	×	23	×	19	4
VIII (BCU 6)	0	×	×	0	0
XI (BCU 7)	×	8	×	6	2
X (BCU 8)	4	10	×	5	9

Os resultados apresentados nas tabelas (4.4) e (4.5), mostram-se promissores, uma vez que 100% as contingências críticas foram identificadas pela ferramenta proposta.

Uma análise apurada dos resultados mostra que, das 114 contingências propostas no SEP, 22 provocariam a ocorrência de um ilhamento no sistema pós-falta. Com isto verifica-se que o filtro preliminar para detecção de ilhamento têm 100% de acerto na identificação de casos de ilhamento, ratificando as bases teóricas sobre as quais o mesmo foi proposto.

O filtro de detecção de pontos de equilíbrio assintóticamente estáveis aplicado a configuração pós-falta do SEP, conseguiu identificar o a.s.e.p. em 100% dos casos, não sendo necessário o envio de nenhum caso para a simulação, no domínio do tempo, do SEP. É importante ressaltar que este filtro preliminar foi aplicado apenas às contingências que não causam o ilhamento do sistema pós-falta, dado o projeto seqüencial da ferramenta de avaliação de segurança dinâmica proposta neste trabalho.

Os filtros BCU 2, 3, 6 e 8, responsáveis por detectar casos altamente estáveis, ou seja, contingências cujo tempo crítico de abertura t_{cr} é muito maior que o tempo de atuação do respectivo sistema de proteção, t_{ab}, do SEP sob análise, conseguiram detectar 68% dos casos estáveis do sistema, enviando apenas 32% dos casos estáveis para a análise no

domínio do tempo.

É importante salientar que o novo filtro classificador BCU 3, proposto neste trabalho, projetado para detecção de *swings* estáveis no período em falta, foi responsável por detectar 58% dos casos estáveis, o que mostra uma importante contribuição para a análise de segurança dinâmica de SEPs utilizando métodos diretos.

É também necessário mencionar, para um completo entendimento da tabela (4.5), que para o filtro classificador BCU 8, as 5 contingências classificadas como casos estáveis pelo mesmo, também foram classificadas como estáveis através da simulação, no domínio do tempo, do SEP, e dentre as 10 contingências classificadas como casos incertos (potencialmente instáveis), 9 foram verificadas de fato, através da simulação do sistema, casos instáveis e 1 como um caso estável. Dessa forma ratifica-se o conservadorismo das análises realizadas pelos filtros classificadores BCU, e justifica-se seu emprego na análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, em tempo real.

Os filtros BCU 1, 4, 5, 7 e 8, responsáveis por detectar casos potencialmente instáveis e casos incertos, onde existe a possibilidade de falhas em algum dos passos que compõem o método BCU, detectaram 100% das contingências críticas ao SEP sob análise. Tal resultado ratifica o conservadorismo da ferramenta proposta na análise de segurança dinâmica em tempo real de SEPs.

Por fim, uma análise do tempo computacional é apresentada na tabela (4.6), a fim de comparar, ao menos qualitativamente, o esforço computacional empregado na análise clássica (simulação) com a análise via métodos diretos, utilizada pela ferramenta aqui proposta, na análise de segurança dinâmica, no contexto TSA, de SEPs.

Tabela 4.6: Comparação entre os tempos de processamento da análise clássica de estabilidade transitória e da ferramenta computacional, baseada em métodos diretos, proposta neste trabalho.

Tipo de Análise	Tempo Requerido (s)
Análise Clássica	48.329
Ferramenta Proposta	41.078

É importante ressaltar que os resultados demonstrados acima apenas permitem comparar de forma qualitativa o esforço computacional empregado a fim de obter os resultados da análise requerida, uma vez que nenhum dos casos foi executado em um ambiente de computação em tempo real, ou seja, durante a execução do programa de análise de segurança dinâmica o processador do computador não foi inteiramente alocado para a execução desta tarefa. Deve-se observar também que para a análise clássica foi empregado o filtro para detecção de ilhamento no SEP pós-falta, o que tornou desnecessária a simulação, no domínio do tempo, do sistema para 22 casos aumentando a velocidade desta análise.

Outro fator importante a observar na comparação de ambas as análises é o fato de que na análise clássica, uma única simulação é realizada a fim de observar a estabilidade

ou não do SEP, o que não torna disponível qualquer informação sobre a margem de estabilidade do mesmo. Por outro lado, a ferramenta proposta neste trabalho, baseada em métodos diretos, inclui a possibilidade de quando não quantitativamente (a partir da determinação do c.u.e.p. e da respectiva estimativa do tempo crítico de abertura $\hat{t}_{cr}$) ao menos qualitativamente (a partir de margens intermediárias de energia) determinar uma margem de estabilidade para todos os casos analisados.

Deve-se observar ainda que nenhum esforço adicional foi empregado para realizar um ajuste mais fino dos valores limites utilizados pelos classificadores BCU. Tal fato demonstra que os mesmos apresentam grande robustez em relação aos valores de ajuste destes.

Com isso, atesta-se a eficiência da ferramenta de análise de segurança dinâmica, no contexto da estabilidade transitória, de SEPs via métodos diretos desenvolvida neste trabalho.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas Futuras

5.1 Comentários e Conclusões Finais

Neste trabalho uma ferramenta computacional para avaliação da segurança dinâmica de SEPs em tempo real, no contexto da estabilidade transitória, via métodos diretos foi desenvolvida.

A ferramenta proposta, baseia-se numa série de filtros classificadores, que aplicados seqüencialmente visam identificar, dada uma lista de contingências plausíveis de ocorrerem, todas aquelas que são críticas ao sistema no contexto TSA.

Tal ferramenta é composta por 11 filtros classificadores, cuja concepção proporciona cinco características essenciais à análise de segurança dinâmica de SEPs em tempo real:

1. *Confiabilidade:* captura absoluta de todas as contingências críticas (casos instáveis), presentes na lista de contingências previamente selecionada pelo operador do SEP. Em outras palavras, a razão entre o número de casos classificados como instáveis e o número real de contingências críticas deve ser 1;

2. *Eficiência:* alta precisão na classificação de casos estáveis, ou seja, a razão entre o número de casos classificados como estáveis e o número real de caso estáveis do SEP deve ser tão próximo de 1 quanto possível;

3. *Velocidade:* rapidez na classificação de cada contingência;

4. *Robustez:* desempenho robusto com respeito às variações das condições de operação do sistema e às mudanças freqüentes de topologia do mesmo;

5. *Adaptabilidade em tempo real:* pequena necessidade de ajustes antes da inicialização da análise quando ocorrem variações no ponto de operação ou topologia do sistema.

O primeiro filtro classificador preliminar classifica como crítica todas as contingências que causam ilhamento no SEP pós-falta, enquanto o segundo classifica como um caso

incerto aquelas cujo a.s.e.p. pós-falta não foi identificado pelo método de Newton-Raphson enviando as mesmas diretamente para o filtro complementar de simulação, no domínio do tempo, do sistema.

Os próximos 8 filtros classificadores se baseiam nos passos que compõem o método BCU. Tais classificadores têm a função de detectar os casos altamente estáveis bem como os casos incertos (potencialmente instáveis), para o SEP sob análise, de forma rápida e eficiente, evitando, desta forma, que um número excessivo de contingências sejam enviadas para a simulação, no domínio do tempo, no primeiro caso e que cálculos desnecessários sejam realizados em contingências que apresentem possibilidade de classificação errônea no segundo.

As contingências detectadas como casos incertos pelos classificadores BCU são enviadas ao filtro complementar, baseado na simulação, no domínio do tempo, do sistema para uma análise apurada de estabilidade.

Os resultados obtidos pela aplicação da ferramenta proposta mostram-se promissores, tanto quanto à exatidão e conservadorismo como quanto à velocidade de execução, ratificando assim a importância do estudo e desenvolvimento de metodologias baseadas em métodos diretos para avaliação da análise de segurança dinâmica em tempo real de SEPs.

5.2 Contribuições Originais deste Trabalho

Como fruto das pesquisas desenvolvidas, este trabalho de pesquisa possui duas contribuições originais para a análise de segurança dinâmica de SEPs:

1. Filtro para detecção da ocorrência de ilhamento no sistema pós-falta: uma nova formulação foi proposta para a identificação de todos os ramos críticos para o SEP sob análise e sua fundamentação teórica foi rigorosamente provada;

2. Filtro para detecção de *swings* estáveis no período em falta: um novo filtro classificador BCU foi proposto para a detecção de casos altamente estáveis, no contexto TSA, baseado na detecção de um *swing* estável no período em falta, através do uso do algoritmo *Shadowing Method*.

5.3 Perspectivas Futuras

Como perspectivas futuras deste trabalho, pretende-se estender a aplicação da ferramenta desenvolvida para modelos reduzidos de SEPs considerando modelos detalhados de geradores [21], [48] e também para modelos com rede preservada [21], [62], de modo a comparar os resultados obtidos anteriormente para ambos os modelos e possibilitar o desenvolvimento de novos classificadores BCU. A utilização de computação distribuída e paralela é uma extensão natural da ferramenta proposta uma vez que sua aplicação é necessária em

tempo real, e podendo a análise de cada caso ser considerada uma tarefa independente, diversos processadores podem analisar diversos casos concorrentemente.

Pretende-se também implementar um filtro complementar para simulação no domínio do tempo refinado [59], para determinação de estimativas do tempo crítico de abertura ($\hat{t}_{cr}$), utilizando as informações advindas do filtro classificador BCU que enviou o caso para a análise via simulação no domínio do tempo a fim de aumentar as funcionalidades (análise da margem de estabilidade transitória de SEPs), bem como a velocidade (melhor aproximação, advindo dos filtros classificadores BCU, e menor número de análises no domínio do tempo) das simulações requeridas pela ferramenta computacional aqui proposta.

Por fim, destaca-se que a análise de estabilidade transitória para modelos de SEP com duas escalas de tempo [3] será objeto de futuras pesquisas, por parte do autor e do orientador deste trabalho em nível de doutorado. Pretende-se obter novos algoritmos, numericamente mais robustos e eficientes, para o cálculo do c.u.e.p. e respectiva determinação da estabilidade do SEP, baseados na decomposição do modelo original do sistema em dois subsistemas, sendo um denominado rápido e outro lento, de menores ordens e numericamente melhores condicionados que o modelo original do sistema.

Referências Bibliográficas

[1] Alberto, L.F.C. e Bretas, N.G., *"Synchronism versus stability in power systems: Frequency dependent loads"*, Proceedings of the POWERCON '98, Vol. 2, pg. 1341-1345, ago 1998.

[2] Alberto, L.F.C., Silva, F.H.J.R. e Bretas, N.G., *"Direct methods for transient stability analysis in power systems: state of art and future perspectives"*, Proceedings of the IEEE Porto Power Tech, Vol. 2, 6 pg., set 2001.

[3] Alberto, L.F.C. e Chiang, H.-D., *Uniform Approach for Stability Analysis of Fast Subsystem of Two-Time Scale Nonlinear Systems*, International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 17, No. 11, pg. 4195-4203, 2007.

[4] Anderson, P.M. e Fouad, A.A., *Power System Control and Stability*, 2ª edição, IEEE Press - John Wiley $ Sons, Hoboken, NJ, 2003.

[5] Athay, T., Podmore, R. e Virmani, S., *"A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability"*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 2, pg. 573-584, mar 1979.

[6] Balu, N., Bertram, T., Bose, A., Brandwajn, V., Cauley, G., Curtice, D., Fouad, A., Fink, L., Lauby, M.G., Wollenberg, B.F. e Wrubel, J.N., *"On-Line Power System Security Analysis"*, Proceedings of the IEEE, Vol. 80, pg. 262-282, fev 1992.

[7] Bretas, N.G. e Alberto, L.F.C., *"Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos"*, Projeto REENGE -EESC/USP, São Carlos, SP, 2000.

[8] Bretas, N.G. e Alberto, L.F.C., *"Lyapunov Function for Power Systems with Transfer Conductances: Extension of the invariance Principle"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pg. 769-777, mai 2003.

[9] Burden, R.L. e Faires, J.D.,*"Análise Numérica"*, Editora Thomson, São Paulo, SP, 2003.

[10] Chadalavada, Y., Vittal, Y, Ejebe, G.C., Irisarri, G.D., Tong, J., Pieper, G. e McMullen, M., *"An On-Line Contingency Filtering Scheme for Dynamic Security As-*

sessment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pg. 153-161, fev 1997.

[11] Chiang, H.-D., Wu, F.F. e Varaiya, P.P., *"Foundations of direct methods for power system transient stability analysis"*,IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 34, No. 2, pg. 160-173, fev 1987.

[12] Chiang, H.-D, Hirsch, M.W. e Wu, F.F., *Stability Regions of Nonlinear Autonomous Dynamical Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 33, No. 1, pg. 16-27, jan 1988.

[13] Chiang, H.-D., Wu, F.F. e 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, pg. 712-728, jun 1988.

[14] Chiang, H.-D., *"A theory-based controlling UEP method for direct analysis of power system transient stability"*, IEEE ISCAS'89, Vol. 13, pg. 1980-1983, mai 1989.

[15] Chiang, H.-D. e 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, pg. 1187-1200, set 1989.

[16] 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, pg. 1423-1429, nov 1989.

[17] Chiang, H.-D. e Fekih-Ahmed, L., *"On the direct method for transient stability analysis of power system structure preserving models"*, Proceedings of the IEEE ISCAS'92, Vol. 5, pg. 2545-2548, mai 1992.

[18] Chiang, H.-D., Wu, F.F. e Varaiya, P.P., *"A BCU method for direct analysis of power system transient stability"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pg. 1194-1208, ago 1992.

[19] Chiang, H.-D., Liu, C-W., Varaiya, P.P., Wu, F.F. e Lauby, M.G., *"Chaos in a simple power system"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 4, pg. 1407-1417, nov 1993.

[20] Chiang, H.-D. e Chu,C.-C.,*"Theoretical Foundation of the BCU Method for Direct Stability Analysis of Network-Reduction Power System Models with Small Transfer Conductances"*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 42, No. 5, pg. 252-265, mai 1995.

[21] Chiang, H.D., Chu,C.-C. e Cauley, G.,*"Direct Stability Analysis of Electric Power Systems Using Energy Functions: Theory, Applications, and Perspectives"*, Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 11, pg. 1497-1529, nov 1995.

[22] Chiang, H.-D., Li, H., Yan, Z. e Wang, C.-S., *"BCU classifiers for on-line dynamic contingency screening of electric power systems"*, Proceedings of the POWERCON'98, Vol. 2, pg. 1260-1265, ago 1998.

[23] Chiang, H.-D., Wang,C.-S. e Li, H., *"Development of BCU classifiers for on-line dynamic contingency screening of electric power systems"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, pg. 660-666, mai 1999.

[24] Chiang, H.-D. e Subramanian, A.K., *"BCU dynamic security assessor for practical power system models"*, Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pg. 287-190, jul 1999.

[25] Coelho, F.U. e Lourenço, M.L., *"Um Curso de Álgebra Linear"*, 2ª edição, EDUSP, São Paulo, SP, 2005.

[26] Fujii, W., Wakisaka, J. e Iwamoto, S., *" Transient Stability Analysis Based on Dynamic Single Machine Equivalent"*, NAPS'07, pg. 217-222, out 2007.

[27] Gless, G.E., *"Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability"*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, No. 2, pg. 159-168, fev 1966.

[28] Jardim, J.L., Neto, C.S. e Kwasnicki, W.T., *"Design Features of a Dynamic Security Assessment System"*, 2004 IEEE PES - Power Systems Conference and Exposition, Vol.1, pg. 446-452, out 2004.

[29] Jardim, J., Neto, C. e Santos, M.G., *"Brazilian System Operator Online Security Assessment System"*, PSCE'06 - Power Systems Conference and Exposition, pg. 7-12, nov 2006.

[30] Kakimoto, N., Oshawa, Y., e Hayashi, M., *"Transient Stability Analysis of Electric Power System by Lure-Type Lyapunov Function, Partes I e II"*, IEE of Japan, Vol. 98, No. 5 e 6, mai/jun 1978.

[31] Kakimoto, N. e Hayashi, M., *"Transient stability analysis of multimachine power system by Lyapunov's direct method"*, 20th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, Vol. 20, pg. 464-470, dez 1981.

[32] Kakimoto, N., Ohnogi, Y., Matsuda, H. e Shibuya, H., *"Transient Stability Analysis of Large-Scale Power System by Lyapunov's Direct Method"*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 1, pg. 160-167, jan 1984.

[33] Khalil, H.K.,*"Nonlinear Systems"*, Macmillan Publishing Company, New York, NY, 1992.

[34] Kundur, P., *"Power System Stability and Control"*, The EPRI Power System Engineering Series - McGraw-Hill, New York, 1994.

[35] Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Anderson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyrion, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., Vittal, V., *"Definition and Classification of Power System Stability"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pg. 1387-1401, mai 2004.

[36] Kwatny, H., Bahar, L. e Pasrija, A., *"Energy-like Lyapunov functions for power system stability analysis"*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 32, No. 11, pg. 1140-1149, nov 1985.

[37] Llamas, A., De La Ree Lopez, J., Mili, L., Phadke, A.G. e Thorp, J.S., *"Clarifications of the BCU method for transient stability analysis"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, pg. 210-219, fev 1995.

[38] LaSalle, J.P., *The Stability of Dynamical Systems*, SIAM, Phyladelphia, NJ, 1976.

[39] Lima, E.L.; *"Espaços Métricos"*, Projeto Euclides, 4ª edição, IMPA, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

[40] Liu, C.-W., Thorp, J.S., Lu, J., Thomas, R.J. e Chiang, H.-D., *"Detection of Transiently Chaotic Swings in Power Systems using Real-Time Phasor Measurements"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pg. 1285-1292, ago 1994.

[41] London Jr., J.B.A., Alberto, L.F.C., e Bretas, N.G., *"Analysis of Measurement-set Qualitative Characteristcs for State-Estiamtion Purposes"*, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 1, No. 1, pg. 39-45, jan 2007.

[42] Lyapunov, A.M., *"Problème gènèral de la stabilitè du mouvement"*, Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse, 2ª série, Toulouse, 1907.

[43] Monticelli, A.J., *"Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica"*, Editora Edgard Blücher, São Paulo, SP, 1983.

[44] Mori, H. e Ando, E., *"Dynamic contingency screening with simplified fuzzy inference in power systems"*, Proceedings of the IEEE SMC'99, Vol. 6, pg. 539-544, 1999.

[45] Morison, K., *"On-line dynamic security assessment using intelligent systems"*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 5 pg., 2006.

[46] Nazareno, I.S., Alberto, L.F.C. e Bretas, N.G., *"Problems in the Precise Determination of BCU's Controlling Unstable Equilibrium Points and PEBS 's Exit Point Method in Real-Time Transient Stability Analysis"*, IEEE/PES T&D Conference & Exposition: Latin America, pg. 475-480, nov 2004.

[47] Paganini, F. e Lesieutre, B.C., *"Generic properties, one-parameter deformations, and the BCU method"*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 46, No. 6, pg. 760-763, jun 1999.

[48] Pai, M.A., *Power System Stability - Analysis by the Direct Method of Lyapounov*, North-Holland Publishing Company, New York, NY, 1981.

[49] Quadros, M.A., Neto, C.A.S., Pires, G. e Moreale, M.S., *"Aplicação da Avaliação Dinâmica e Estática do SIN nos Centros de Operação do ONS"*, X EDAO - Encontro para Debates de Assuntos de Operação, 10 pg., nov 2008.

[50] Ramos, R.A., Alberto, L.F.C., Bretas, N.G., *Modelagem de Máquinas Síncronas aplicada ao Estudo de Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência*, Apostila - EESC/USP, São Carlos, SP, 2000.

[51] Rodrigues, H.M., Alberto, L.F.C. e Bretas, N.G., *"On the invariance principle: generalizations and applications to synchronization"*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 47, No. 5, pg. 730-739, mai 2000.

[52] Rodrigues, H.M., Alberto, L.F.C. e Bretas, N.G., *"Uniform Invariance Principle and Synchronization. Robustness with Respect to Parameter Variation"*, Journal of Differential Equations, Vol. 169, No. 1, pg. 228-254, jan 2001.

[53] Sauer, P.W., Pai, M.A., *Power System Dynamics and Stability*, Editora Prentice Hall, New Jersey, NY, 1998.

[54] Savulesco, S.C., *Grafos, Dígrafos e Redes Elétricas*, IBEC - Instituto Brasileiro de Edições Científicas, São Paulo, SP, 1980.

[55] Scruggs, J. e Mili, L., *"Dynamic gradient method for PEBS detection in power system transient stability assessment "*, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 23, No. 2, pg. 155-165, fev 2001.

[56] Silva, F.H.J.R., Alberto, L.F.C., London Jr, J.B. e Bretas, N.G., *"Smooth Perturbation on a Classical Energy Function for Lossy Power System Stability Analysis"*,IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 52, No. 1, pg. 222-229, jan 2005.

[57] Srinivasan, D., Chang, C.S., Liew, A.C. e Leong, K.C., *"Power system security assessment and enhancement using artificial neural network"*, Proceedings of EMPD '98, Vol. 2, pg. 582-587, mai 1998.

[58] Stevenson, W.D., *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, 2ª edição em português, Editora McGraw-Hill, São Paulo, SP, 1986.

[59] Tada, Y., Kurita, A., Zhou, Y., Koyanagi, K., Chiang, H.-D. e Zheng, Y., *A BCU-guided Time-Domain Simulation Method for Energy Margin Calculation to Improve BCU-DSA System*, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Vol.1, pg. 366-371, out 2002.

[60] Tinney, W.F., Brandwajn, V. e Chan, S.M., *"Sparse Vector Methods"*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, No. 2, pg. 295-301, fev 1985.

[61] Treinen, R.T.,Vittal, V. e 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, pg. 313-323, abr 1996.

[62] Varaiya, P., Wu, F. e Chen, R.-L., *"Direct Methods for transient Stability Analysis of Power Systems: Recent Results"*, Proceedings of IEEE, Vol. 73, No. 12, pg. 1703-1715, dez 1985.

[63] Van Cutsem, T. e Ribbens-Pavella, M. *"Structure Preserving Direct Methods for Transient Stability Analysis of Power Systems"*, 24th IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 24, Parte I, pg. 70-76, dez 1985.

[64] Zhang, Y. e Tinney, W. F., *"Partial Refactorization with Unrestricted Topology Changes"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pg. 1361-1368, ago 1995.

[65] Zhang,Y., Wehenkel, L., Rousseaux, P. e Ribbens-Pavella, M., *"First- and multi-swing transient stability limits of a longitudinal system using the SIME method"*, MELECON '96., Vol. 2, pg. 809-815, mai 1996.

[66] Zou, Y., Yin, M.-H. e Chiang,H.-D., *"Theoretical foundation of the controlling UEP method for direct transient-stability analysis of network-preserving power system models"*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 50, No. 10, pg. 1324-1336, out 2003.

Apêndice A

Dados Estáticos e Dinâmicos dos SEPs Estudados

A.1 Descrição do formato de entrada de dados

O formato dos dados de entrada, para a ferramenta de análise de segurança dinâmica desenvolvida neste trabalho, foi inspirado no padrão "`.pwf`"[1], utilizado pelo programa Anarede^{TM} (Analisador de Redes), desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

Os dados estáticos das barras (`DBAR`), linhas e transformadores (`DLIN`) estão dispostos consecutivamente no arquivo de entrada, observando o padrão "`.pwf`" a menos da adição de duas colunas extras nos dados `DLIN` onde se indicam as opções pela extremidade do equipamento em curto-circuito durante a falta[2] e o tempo de atuação do sistema de proteção primário associado ao equipamento de transmissão, enquanto os dados dos modelos dinâmicos dos geradores (`DGER`) e dos modelos estáticos das cargas (`DCAR`), são fornecidos em um formato equivalente ao padrão anterior, conforme apresentado a seguir.

A.2 Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido

O conteúdo do arquivo de entrada para o sistema sul brasileiro equivalente reduzido, composto por 10 geradores síncronos, 17 transformadores e 40 linhas de transmissão, é apresentado na seqüência:

[1] A descrição detalhada do padrão "`.pwf`", utilizado neste trabalho, pode ser encontrada no manual do programa Anarede^{TM} (versão 2008).

[2] Como convenção na ferramenta de análise desenvolvida utiliza-se: 1 - para aplicação do curto-circuito em cada das extremidades do equipamento (realizam-se duas análises sendo a primeira para a extremidade indicada no campo "`De`" e a segunda para a extremidade indicada no campo "`Para`"); 2 - para a aplicação do curto-circuito somente na extremidade do equipamento indicada no campo "`De`"; e 3 - para a aplicação do curto-circuito na somente extremidade do equipamento indicada no campo "`Para`".

Arquivo de dados do Sistema Sul Brasileiro Equivalente Reduzido

```
DBAR
(Num)OETGb(    nome    )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc   )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)
 343        IVAIPORA 525 11034-6.9                                        -250.1
 344        LONDRINA 525 11025-9.3                                             1
 366    1   ITA      GER 11020-6.7 650.-38.3-99999999.                         1
 367        SIDEROPO 230 1 974-32.                          177.  68.          1
 368        FARROUPI 230 11020-34.                          191.  42.          1
 369    1   P.FUNDO  GER 11040-14. 215.51.29-99999999.                         1
 370        P.FUNDO  230 11022-19.                          171. 18.5          1
 371        XANXERE  230 1 999-16.                          126.  47.          1
 372        P.BRANCO 230 1 997-10.                           46. 14.7          1
 373    1   S.OSORIO GER 110203.07 895.88.55-99999999.                         1
 374        S.OSORIO 230 11015-2.6                          281. 56.5          1
 375        AREIA    230 11016-11.                          279. 60.7          1
 376        S.MATEUS 230 11014-21.                          130. 29.4          1
 377        CURITIBA 230 11026-21.                          427. -25.          1
 378        JOINVILE 230 1 972-27.                          310. 141.          1
 379        BLUMENAU 230 11002-26.                          424. 90.6          1
 380        PALHOCA  230 1 993-28.                          117. 53.1          1
 381    2   GBMUNHOZ GER 11022   0.1530.-130.-99999999.                        1
 382        AREIA    525 11035-5.6                                             1
 383        CURITIBA 525 11029-19.                                      -60.   1
 384        C.LARGO  525 11033-17.                          368. 59.6          1
 385        BLUMENAU 525 11011-24.                                             1
 386        ITA      525 11029-11.                          174.  -8. -100.1
 387        GRAVATAI 525 11026-29.                                      -150.1
 388        V.AIRES  525 11027-23.                                      -150.1
 389        C.NOVOS  525 11032-9.7                                      -170.1
 390    1   S.SANTIA GER 110186.931325. -56.-99999999.                         1
 391        S.SANTIA 525 11035-1.3                                             1
 392    1   J.LAC.A  GER 11030-24.  90.39.02-99999999.                         1
 393        J.LACERD 138 11000-28.                          125. 39.8          1
 394    1   J.LAC.B  GER 11030-23. 120.41.26-99999999.                         1
 395    1   J.LAC.C  GER 11030-21. 241.69.32-99999999.                         1
 396        J.LACERD 230 11005-27.                                             1
 397    1   SEGREDO  GER 110202.721100.-141.-99999999.                         1
 398        SEGREDO  525 11032-1.4                                             1
 399        SECI     230 11029-33.                          813. 110.          1
 402        GRAVATAI 230 11039-32.                          612. -455.         1
 407    1   ITAUBA   GER 11020-14. 460.104.4-99999999.                         1
 408        ITAUBA   230 11002-20.                          404. 135.          1
 414        V.AIRES  230 11033-25.                          393. -111.         1
 430        APUCARAN 230 1 992-15.                          262. 13.2          1
 431        LONDRINA 230 11010-11.                          229. 183.          1
 432        MARINGA  230 1 982-15.                          184. 60.2          1
 433        C.MOURAO 230 1 979-13.                          139. 53.7          1
 437        FORQUILH 230 1 972-32.                          90.1 55.3          1
99999
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc   )(Cn)(Ce)Ns(F)tab
 343        344  1     .035   .725   332.2                          25003000    1 100
 343        382  1      .18   2.27   227.21                         25003000    1 100
 343        391  1      .14   2.04   244.75                         25003000    1 100
 344        431  1            .63                                   18601860    1 100
 366        386  1           1.35                                   18601860    1 100
 367        368  1     3.86   19.85   34.                           300 350     1 100
 367        396  1      .96   4.91   8.42                           300 350     1 100
 367        437  1      .33   1.67   28.59                          300 350     1 100
```

```
    368     370  1    2.315  16.89   81.68                          300 350    1 100
    368     399  1     .59   3.033   47.55                          300 350    1 100
61  369     370  1           4.6                                    18601860   1 100
    370     371  1    .815   4.175   28.8                           300 350    1 100
    370     408  1     2.5   16.48   46.9                           300 350    1 100
    371     372  1    1.63   8.35   14.4                            300 350    1 100
    371     374  1    3.16   16.21   27.84                          300 350    1 100
66  372     374  1    1.53   8.61   13.44                           300 350    1 100
    373     374  1           1.14                                   18601860   1 100
    374     375  1    3.06   15.23   27.02                          300 350    1 100
    374     433  1    1.72    8.8   60.8                            300 350    1 100
    375     376  1    2.45   12.56   20.41                          300 350    1 100
71  375     382  1            3.                                    18601860   1 100
    376     377  1     .88   4.15   52.11                           300 350    1 100
    377     378  1     .91   4.675   31.9                           300 350    1 100
    377     383  1            .62                                   18601860   1 100
    378     379  1     .77   3.88   27.                             300 350    1 100
76  379     380  1    1.08   5.525   37.26                          300 350    1 100
    379     385  1            .62                                   18601860   1 100
    380     396  1      .9    4.6   31.06                           300 350    1 100
    381     382  1            .67                                   18601860   1 100
    382     383  1     .19    2.8   335.76                          25003000   1 100
81  382     384  1     .19   2.74   328.67                          25003000   1 100
    382     386  1     .14   1.95   239.68                          25003000   1 100
    382     398  1     .05     .7   83.92                           25003000   1 100
    383     384  1     .05    .69   82.15                           25003000   1 100
    383     385  1     .12   1.75   209.7                           25003000   1 100
86  386     387  1     .21   3.09   371.83                          25003000   1 100
    387     402  1            .62                                   18601860   1 100
    388     389  1     .22     3.   383.                            25003000   1 100
    388     414  1            .62                                   18601860   1 100
    389     391  1     .14   1.95   239.7                           25003000   1 100
91  390     391  1           1.14                                   18601860   1 100
    391     398  1     .05     .7   83.92                           25003000   1 100
    392     393  1           8.71                                   18601860   1 100
    393     396  1            5.9                                   18601860   1 100
    394     396  1           7.01                                   18601860   1 100
96  395     396  1            4.5                                   18601860   1 100
    396     437  1    1.29   6.57   11.28                           300 350    1 100
    397     398  1            .68                                   18601860   1 100
    399     402  1     .07   .358   6.68                            550 600    1 100
    399     414  1    .613   3.162                                  550 600    1 100
101 407     408  1           2.36                                   18601860   1 100
    408     414  1    2.02   11.29   20.62                          300 350    1 100
    430     431  1    .528   2.979   19.05                          300 350    1 100
    430     432  1     1.1   11.84   20.27                          300 350    1 100
    430     433  1    2.29   11.74   20.27                          300 350    1 100
106 431     432  1     .86   4.42   28.68                           300 350    1 100
    432     433  1    1.81   9.29   16.07                           300 350    1 100
    99999
    DGER
    (
111 (M = 1 -> modelo clássico    M = 2 -> modelo de 1 eixo
    (H -> constante de inércia MW.s/MVA
    (
    (modelo de 1 eixo do gerador
    (Bar)M(x'd(%)( xd(%)(x'q(%)( xq(%)(     H)(     D)( Tdlo)
116 (
    (modelo clássico do gerador
```

```
(Bar)M(x'd(%)(     H)(     D)
 366 1   4.570 37.320
 369 1   9.850 11.300
 373 1   3.000 39.470
 381 1   1.800 74.400
 390 1   2.150 57.280
 392 1  13.500  3.560
 394 1  15.350  5.060
 395 1  10.070  9.680
 397 1   1.840 51.630
 407 1   5.500 20.340
(
99999
DCAR
(     CARG ATIV CARG REAT      )
(Bar)(Z(%)(I(%)(Z(%)(I(%)VLFD%
 367 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 368 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 370 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 371 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 372 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 374 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 375 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 376 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 377 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 378 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 379 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 380 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 384 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 386 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 393 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 399 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 402 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 408 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 414 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 430 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 431 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 432 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 433 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
 437 100.0 0.0 100.0 0.0    0.0
(
99999
```

Apêndice B

Notas sobre a Álgebra Módulo-2

B.1 Introdução à Estrutura Algébrica de um Corpo

A álgebra módulo-2 é a álgebra mais adequada ao tratamento da teoria envolvida na concepção do filtro para identificação de ilhamento no SEP pós-falta proposto neste trabalho. Esta álgebra está definida para o corpo de módulo-2, assim, primeiramente vamos abstrair e dar a conhecer a estrutura algébrica de um corpo.

Definição B.1.1 (Definição de Corpo [25]). *Um conjunto não vazio $\mathbb{K}$ é um corpo se em $\mathbb{K}$ pudermos definir duas operações, denotadas por + (adição) e $\cdot$ (multiplicação), satisfazendo as seguintes propriedades:*

(A1) $a+b = b+a$, $\forall a, b \in \mathbb{K}$;

(A2) $a+(b+c) = (a+b)+c$, $\forall a, b, c \in \mathbb{K}$;

(A3) Existe um elemento em $\mathbb{K}$, denotado por 0, chamado de elemento neutro da adição, que satisfaz $0+a = a+0 = a$, $\forall a \in \mathbb{K}$;

(A4) Para cada $a \in \mathbb{K}$, existe um elemento em $\mathbb{K}$, denotado por $-a$ e chamado de oposto de a tal que $a+(-a) = (-a)+a = 0$;

(M1) $a \cdot b = b \cdot a$, $\forall a, b \in \mathbb{K}$;

(M2) $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$, $\forall a, b, c \in \mathbb{K}$;

(M3) Existe um elemento em $\mathbb{K}$, denotado por 1, chamado de elemento neutro da multiplicação, que satisfaz $1 \cdot +a = a \cdot 1 = a$, $\forall a \in \mathbb{K}$;

(M4) Para cada elemento não nulo $a \in \mathbb{K}$, existe um elemento em $\mathbb{K}$, denotado por a^{-1} e chamado inverso multiplicativo de a, tal que $a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = 1$;

(D) $(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$, $\forall a, b, c \in \mathbb{K}$.

B.2 Definições para o Corpo Módulo-2

Uma vez definido o que é um corpo algébrico, o corpo módulo-2 é uma estrutura algébrica que comporta apenas dois elementos: 0 e 1, ou seja, $\mathbb{Z}_2 = \{0, 1\}$, sendo as operações de + (adição) e · (multiplicação) definidas como:

- a+b = d, onde d é o resto da divisão usual (sobre o corpo $\mathbb{R}$) de a+b por 2, ou seja, a+b = c·2+d, sendo a,b,c,d $\in \mathbb{Z}_2$;
- a·b = d onde d é o resto da divisão usual (sobre o corpo $\mathbb{R}$) de a·b por 2, ou seja, a·b = c·2+d, sendo a,b,c,d $\in \mathbb{Z}_2$.

Desta maneira, pode-se mostrar que o conjunto $\mathbb{Z}_2 = \{0, 1\}$, munido das operações de adição e multiplicação definidas anteriormente é um corpo, e será portanto denotado de corpo módulo-2.

Para efeitos práticos pode-se resumir as operações de adição (+) e multiplicação (·) no corpo módulo-2 nas seguintes possibilidades:

$$0 + 0 \;=\; 0;\; 0 + 1 \;=\; 1 + 0 \;=\; 1;\; 1 + 1 \;=\; 0$$

$$0 \cdot 0 \;=\; 0;\; 0 \cdot 1 \;=\; 1 \cdot 0 \;=\; 0;\; 1 \cdot 1 \;=\; 1$$

Por fim, é importante observar que os conceitos algébricos de independência linear, posto, inversão de uma matriz, etc., são válidos em qualquer corpo e portanto aplicáveis também ao corpo módulo-2.

Apêndice C

Publicações referentes a esta Pesquisa

C.1 Congressos Internacionais

- Theodoro, E. A. R., Bretas, N. G. e Alberto, L. F. C., **"Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Análise de Segurança Dinâmica de SEPs utilizando Métodos Diretos"**, apresentado no 8° CLAGTEE 2009 - Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, Ubatuba - SP, outubro de 2009.

- Theodoro, E. A. R. e Alberto, L. F. C., **"Dynamic Security Assessment of the South-Southeast Brazilian Subsystem using Direct Methods"**, submetido para possível aceitação no VIII IREP Symposium 2010 - Bulk Power System Dynamic Control, Búzios - RJ, a ser realizado em agosto de 2010.

C.2 Congressos Nacionais

- Theodoro, E. A. R., Benedito, R. A. S. e Alberto, L. F. C., **" Método Rápido para Identificação de Ilhamento em Sistemas Elétricos de Potência"**, submetido para possível publicação no XVIII CBA 2010 - Congresso Brasileiro de Automática, Bonito - MS, a ser realizado em setembro de 2010.