

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TATIANA RONDON VIEGAS DA SILVA

**Modelo Matemático para a Melhoria da Estabilidade Transitória de  
Sistemas Elétricos de Potência Baseado na Mudança Estrutural do Sistema  
de Transmissão**

Ilha Solteira

2019

TATIANA RONDON VIEGAS DA SILVA

**Modelo Matemático Para a Melhoria da Estabilidade Transitória de  
Sistemas Elétricos de Potência Baseado na Mudança Estrutural do Sistema  
de Transmissão**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

**Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi**

Orientador

Ilha Solteira

2019

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586m Silva, Tatiana Rondon Viegas da.  
Modelo matemático para a melhoria da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência baseado na mudança estrutural do sistema de transmissão / Tatiana Rondon Viegas da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019 90 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2019

Orientador: Carlos Roberto Minussi  
Inclui bibliografia

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Estabilidade transitória. 3. Análise de sensibilidade. 4. Método de energia de Lyapunov. 5. Margem de segurança. 6. Mudança de impedância do sistema.

  
Raiane da Silva Santos

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA TESE:** Modelo Matemático para a Melhoria da Estabilidade Transitória de Sistemas Elétricos de Potência Baseado na Mudança Estrutural do Sistema de Transmissão


**AUTORA: TATIANA RONDON VIEGAS DA SILVA**

**ORIENTADOR: CARLOS ROBERTO MINUSSI**


Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Profa. Dra. MARA LUCIA MARTINS LOPES  
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Profa. Dra. FERNANDA CASEÑO LIMA TRINDADE ARIOLI  
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

  
Prof. Dr. JOSÉ GUILHERME MAGALINI SANTOS DECANINI  
Câmpus de Presidente Epitácio / Instituto Federal de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 08 de fevereiro de 2019

Ao meu esposo, Mauro  
e aos meus filhos, Mateus e Pedro.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Minussi pela orientação e confiança durante esses quatro anos. Por todas as conversas e todo o aprendizado que elas me propiciaram e que contribuíram tanto para o meu crescimento profissional quanto pessoal.

Ao meu esposo e meus filhos pela compreensão por todas as vezes que precisei me ausentar.

À Professora Liliam Yuli Isoda pelo suporte e apoio a mim oferecidos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus pais e irmãos, pela fé que depositaram em mim, a minha sogra/mãe e cunhadas que me incentivaram e me colocaram em suas orações.

Ao Instituto Federal de Mato Grosso – Campus Pontes e Lacerda - Fronteira Oeste pelo apoio e oportunidade de realizar esse curso de doutorado.

Aos colegas de trabalho, em especial os professores de matemática, que me apoiaram no período em que ainda não havia conseguido o afastamento, me possibilitando conciliar as disciplinas do doutorado e as aulas, além das viagens mensais SP – MT.

Aos amigos que fiz no IFMT, e que levarei por toda a vida, que me apoiaram em todos os momentos (mesmo quando distantes), Manuela, Nilmara, Epaminondas, Joana, Suliane, Alex e Vanderluce.

À UNESP, que me acolheu e me proporcionou a oportunidade tanto do mestrado quanto do doutorado.

Aos funcionários e professores do departamento de Engenharia Elétrica da UNESP de Ilha Solteira.

Ao CCI Catatau, pelos cuidados oferecidos ao meu pequeno Pedro enquanto eu não podia estar por perto.

Aos colegas do laboratório SINTEL pelas conversas, cafés, ideias e conselhos e aos colegas dos outros laboratórios com os quais tive oportunidade de trocar experiências.

Aos amigos que fiz durante esses quatro anos com os quais troquei ideias, preocupações e angústias e que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, dos quais sei que posso e poderei contar sempre com a amizade apesar da distância.

Ao CNPQ por ter me concedido a bolsa de doutorado.

Finalmente, a Deus pela vida e tudo o que alcancei até aqui.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

(Simone de Beauvoir)

## RESUMO

Apresenta-se um modelo matemático, baseado na análise de sensibilidade, para a realização de controle de segurança dinâmica para a melhoria da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência. O controle de segurança dinâmica implementado consiste na alteração da impedância do sistema elétrico pela retirada/inclusão de linhas de transmissão. A proposta consiste em determinar um modelo de sensibilidade da margem de segurança do sistema em relação à admitância (impedância) do elemento considerado. Deste modo, pode-se estimar o impacto que as alterações no sistema de transmissão podem causar sobre a estabilidade transitória do sistema. Com as devidas adaptações, os resultados aqui apresentados podem ser estendidos para o caso do uso de dispositivos FACTS. A análise da estabilidade é realizada, via uso do conceito de sensibilidade da margem de segurança do sistema, que é determinada pelo Método Direto de Lyapunov, por meio da função de energia total do sistema. Trata-se de um resultado que visa dar maior suporte ferramental aos planejadores e aos operadores dos sistemas de energia elétrica. Visando ilustrar os resultados auferidos com a aplicação do modelo proposto, são apresentados os resultados via simulações considerando-se dois sistemas de energia elétrica (sistema de 9 barras / sistema clássico Anderson & Fouad, e uma versão do sistema sul brasileiro).

**Palavras-chave:** Sistemas elétricos de potência. Estabilidade transitória. Análise de sensibilidade. Método de energia de Lyapunov. Margem de segurança. Mudança de impedância do sistema.



## ABSTRACT

This work presents a mathematical model based on sensitivity analysis for the implementation of Security Dynamic Control for improvement of transient stability of electric power systems. The Security Dynamic Control performed corresponds to system impedance change by output/input of transmission lines (TL's). The propose aims to determine a sensitivity model for the security margin of the system in relation to the impedance (susceptance) of the considered element. Thus, it is possible estimate the influence of TL's on transient stability. Considering adaptations and some simplifications, the results obtained with this proposal can be used for FACTS devices. The stability analysis is achieved using the Security Margin concept determined by the direct Lyapunov (energy) method; it is a supporting tool to the planners and operators of electric power systems. In order to illustrate the results obtained with the application of the proposed model, the simulation results are presented considering two electric power systems (9-bus system / Anderson & Fouad classic system, and one version of the South Brazilian system).

**Keywords:** Electric power system. Transient stability. Sensitivity analysis. Energy (Lyapunov) method. Security margin. Transmission system impedance change.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Estabilidade segundo Lyapunov.	30
<b>Figura 2</b> - Estabilidade assintótica.	31
<b>Figura 3</b> - Instabilidade no sentido de Lyapunov.	32
<b>Figura 4</b> - Sistema Elétrico composto por um gerador e uma barra infinita.	40
<b>Figura 5</b> - Aplicação do critério da igualdade de áreas para a análise de estabilidade transitória: (a) 2 LT's em operação e (b) 3 LT's em operação.	44
<b>Figura 6</b> - Variação da margem de segurança, aplicando-se o conceito de EDMS.	66
<b>Figura 7</b> - Diagrama unifilar do sistema de 9 barras proposto por Anderson e Fouad, (2002).	69
<b>Figura 8</b> - Curvas da energia total, da energia potencial e de $D$ , durante a execução do método PEBS iterativo.	73
<b>Figura 9</b> - Diagrama unifilar do sistema Sul reduzido.	77

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Dados das Máquinas do Sistema de 9 Barras.	69
<b>Tabela 2</b> - Dados das Barras de Carga (pu).	70
<b>Tabela 3</b> - Dados das Linhas de Transmissão.	70
<b>Tabela 4</b> - Dados de estabilidade transitória.	71
<b>Tabela 5</b> - Resultados das Simulações Ordenadas por Margem de Segurança, Baseadas na Mudança de Impedância via Inclusão de LT.	75
<b>Tabela 6</b> - Dados das Máquinas Síncronas.	77
<b>Tabela 7</b> - Dados das Barras de Carga.	78
<b>Tabela 8</b> - Dados do Sistema de Transmissão.	80
<b>Tabela 9</b> - Lista de contingências ordenadas por severidade.	82
<b>Tabela 10</b> - Resultados das simulações ordenados pelo valor da margem de segurança.	84
<b>Tabela 11</b> - Dados de estabilidade transitória, considerando a inclusão da linha de transmissão18 - 19.	85

## LISTA DE ACRÔNIMOS

SEP	Sistema Elétrico de Potência;
CSD	Controle de Segurança Dinâmica;
MS	Máquina Síncrona;
MDL	Método Direto de Lyapunov;
LT	Linha de Transmissão;
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System.</i>
CA	Centro de Ângulos;
PCA	Potência acelerante do centro de ângulos;
PEBS	<i>Potential Energy Boundary Surface;</i>
SIMUL	Simulação de Sistemas Elétricos de Potência (Fluxo de Potência e a Análise de Estabilidade Transitória);
MIA	Método da Igualdade de Áreas;
EDMS	Esforço de deslocamento da margem de segurança;
IN	Integração numérica.
MW	Megawatts

## LISTA DE SÍMBOLOS

$N$	Conjunto de índices das máquinas síncronas que compõem o sistema elétrico;
$n$	Número de máquinas síncronas;
$H_i$	Constante de inércia da $i$ -ésima máquina síncrona;
$M_i$	Inércia do sistema;
$\theta$	Vetor das posições angulares das máquinas síncronas relativas ao centro de ângulo;
$\theta_i$	Posição angular da $i$ -ésima máquina síncrona com relação ao centro de ângulo;
$\dot{x}$	Derivada temporal da função $x$ ;
$f_0$	Frequência nominal do sistema;
$\delta_0$	Centro de ângulos;
$\delta_i$	Posição angular da máquina síncrona medida em relação ao centro de ângulos;
$\omega_0$	Velocidade angular do centro de ângulos;
$\omega_i$	Velocidade angular da $i$ -ésima máquina síncrona referida ao centro de ângulos;
$w_i$	Desvio de velocidade angular da $i$ -ésima máquina síncrona em relação ao centro de ângulos;
$Pm_i$	Potência mecânica de entrada da $i$ -ésima máquina síncrona;
$Pe_i$	Potência elétrica de entrada da $i$ -ésima máquina síncrona;
$E_i$	Tensão interna da $i$ -ésima máquina síncrona;
$C_{ij}$	Condutância de transferência;
$B_{ij}$	Susceptância de transferência;
$Y_{RED}$	Matriz de admitância reduzida às barras internas de geração;
$Y_{baum}$	Matriz de admitância de barra, incluídas as barras internas;
$G$	Índice para barras de geração;
$L$	Índice para barras de carga;
$x^e$	Ponto de equilíbrio;
$x_0$	Condição Inicial;
$V(x)$	Função de Lyapunov
$tc$	Tempo crítico;
$Ecrit_r$	Energia crítica do sistema;
$Ee_r$	Energia total do sistema calculada no instante de eliminação do defeito ( $te$ );
$Ec$	Energia Cinética;
$Ep$	Energia Potencial;

$r$	Índice da contingência;
$\mathcal{M}r$	Margem de segurança referente à $r$ -ésima contingência;
$\mathbb{M}$	Margem de Segurança do SEP;
$\mathcal{M}_{min}$	Margem de Segurança Mínima;
$x'd$	Reatância transitória do eixo direto;
$\Delta\{\circ\}$	Incremento de $\{\circ\}$ ;
$\frac{\partial\{\circ\}}{\partial X}$	Derivada parcial de $\{\circ\}$ relativa a $X$ ;
$\frac{\partial\{\circ\}}{\partial X} _{\chi}$	Derivada parcial de $\{\circ\}$ relativa a $X$ , avaliada em $\chi$ ;
$Bl$	Susceptância da linha, $l(u, v)$ , a ser incluída.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>O MODELO DO SISTEMA</b>	<b>22</b>
2.1	INTRODUÇÃO	22
2.2	O MODELO CLÁSSICO DE PRIMEIRA OSCILAÇÃO	23
2.3	O MÉTODO DIRETO DE LYAPUNOV	27
2.4	A FUNÇÃO ENERGIA	33
2.5	ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA	36
2.6	CONCLUSÃO CAPITULAR	38
<b>3</b>	<b>A MELHORIA DA ESTABILIDADE BASEADA NA MUDANÇA DE IMPEDÂNCIA NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO</b>	<b>39</b>
3.1	INTRODUÇÃO	39
3.2	A MELHORIA DA SEGURANÇA BASEADA NO MÉTODO DA IGUALDADE DE ÁREAS	39
3.3	O CRITÉRIO DA MARGEM DE SEGURANÇA	44
3.4	CONCLUSÃO CAPITULAR	48
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE SENSIBILIDADE BASEADA NA MUDANÇA DE IMPEDÂNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO</b>	<b>49</b>
4.1	INTRODUÇÃO	49
4.2	O CÁLCULO DA SENSIBILIDADE DA MARGEM DE SEGURANÇA	50
4.3	SENSIBILIDADE DA POSIÇÃO ANGULAR E DA VELOCIDADE ANGULAR	53
4.4	SENSIBILIDADE DA CONDUTÂNCIA E DA SUSCEPTÂNCIA DO SISTEMA PÓS-FALTA	56
4.5	SENSIBILIDADE DA CONDUTÂNCIA E DA SUSCEPTÂNCIA DO SISTEMA SOB FALTA	59
4.6	CONCLUSÃO CAPITULAR	60

<b>5</b>	<b>ALTERAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO, BASEADA NA SENSIBILIDADE DA MARGEM DE SEGURANÇA</b>	<b>62</b>
5.1	INTRODUÇÃO	62
5.2	INICIALIZAÇÃO DO CÁLCULO DA SENSIBILIDADE DE POSIÇÃO E DA VELOCIDADE ANGULARES	62
5.3	CORREÇÃO DA SEGURANÇA DINÂMICA	65
5.4	CONCLUSÃO CAPITULAR	67
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>68</b>
6.1	INTRODUÇÃO	68
6.2	O SISTEMA DE 3 MÁQUINAS	68
6.3	SISTEMA DE 10 MÁQUINAS	76
6.4	CONCLUSÃO CAPITULAR	86
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>87</b>
7.1	CONCLUSÃO	87
7.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>89</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Sistemas Elétricos de Potência (SEP) interconectados são idealizados para promover um consumo flexível e racional para o mercado consumidor, permitindo a troca entre as várias fontes consumidoras, de acordo com os interesses das partes. A sensibilidade às perturbações de tais sistemas é muito explorada na literatura e tem sido objeto de muitos estudos, principalmente dos estudos que visam a estabilidade à fim de garantir a confiabilidade da operação (BOSSETTI; KHAN, 2017).

A diversificação das fontes de geração (hidráulica, térmica, eólica, solar etc.) e a possibilidade de alternância entre essas fontes são, do ponto de vista da estabilidade transitória, fontes de incertezas e tornam a operação dos sistemas ainda mais complexa. A necessidade da avaliação da estabilidade dos SEP vem crescendo e o monitoramento destes para a prevenção e solução das falhas é indispensável por causa da sua dimensão e da natureza não linear dos modelos que o descrevem (ANDERSON; FOUAD, 2002; WAGH, 2013; SAVULESCU, 2014; ZWEIGLE, 2016). Quando ocorre a perda da estabilidade ou a violação dos limites de capacidades dos equipamentos, torna-se imperativo a adoção de medidas que possibilitem conduzir o sistema ao estado seguro, sendo esta atividade definida como controle preventivo ou controle de segurança (KUNDUR, 1993; MINUSSI; DE FREITAS FILHO, 1998; VARMA, 2015). O controle preventivo associado a um problema de estabilidade eletromecânica é denominado controle de segurança dinâmica (CSD).

Nesta pesquisa apresenta-se um modelo matemático para a melhoria da segurança dinâmica de um SEP, baseado na mudança estrutural da rede por meio da inclusão/retirada de linhas de transmissão levando-se em conta os aspectos dinâmicos da rede, ou seja, os efeitos provocados por perturbações que causam oscilações acentuadas nos ângulos das máquinas síncronas (MS) (estabilidade transitória) (ANDERSON; FOUAD, 2002). Serão tratadas aqui as perturbações do tipo curto-circuito.

A realização do CSD requer que seja feita, *a priori*, a análise da estabilidade transitória do SEP. Assumindo-se que o sistema opera inicialmente em regime estável, a ocorrência repentina de um distúrbio demanda uma solução em um tempo de eliminação de defeito “aceitável”, de forma que o sistema consiga retomar a estabilidade. A análise de estabilidade dinâmica é feita considerando-se dois conjuntos de equações diferenciais representando as configurações sob falta e pós-falta, sendo que a solução das equações que representam o estado sob

falta são as condições iniciais para os sistemas pós-falta. A solução dos sistemas de equações pode ser feita numericamente, através de simulações que descrevem o movimento do sistema para, em seguida, avaliar as soluções obtidas, por meio das curvas das oscilações das MS. Não há restrições quanto ao modelo a ser empregado para as técnicas de simulações, além disso, tais técnicas são precisas em seus resultados.

Apesar de apresentar bons resultados, o emprego das técnicas supracitadas não permite avaliar, com facilidade, o quão estável ou instável é o sistema quando associado a contingência sob avaliação. Buscando uma análise mais sistemática e com um tempo de cálculo mais competitivo, e portanto, menor custo computacional, a análise de estabilidade será feita utilizando o Método Direto de Lyapunov (MDL) (PAI, 1981; PAVELLA, ERNEST; RUIZ-VEGA, 2000), quando se trata do modelo clássico (ANDERSON; FOUAD, 2002).

O controle de segurança dinâmica apresentado nesta pesquisa será feito via mudança estrutural no SEP com alteração da impedância do sistema de transmissão, como resultado da inclusão de novas linhas de transmissão. A alteração na impedância do sistema de transmissão influencia o estado de equilíbrio do sistema, assim, propõe-se um modelo baseado na sensibilidade da margem de segurança da energia do SEP com relação à susceptância permitindo-se então, quantificar e qualificar o impacto sobre a margem de segurança do sistema, quando da ocorrência de mudanças paramétricas no sistema de transmissão.

O modelo desenvolvido nesta pesquisa baseia-se nos fundamentos apresentados por Minussi e Freitas (1998), que desenvolveu um modelo baseado na análise de sensibilidade para estabelecer critérios para a aplicação do redespacho de geração após a ocorrência de falhas no sistema. A ação de controle realizada neste trabalho refere-se ao reforço da transmissão via entrada em operação e / ou inclusão de elementos de transmissão, podendo ser estendido para a inclusão de dispositivos FACTS, embora seja apresentado um procedimento embrionário abordando-se apenas os casos referentes à entrada em operação de Linha de Transmissão (LT). Os efeitos dos dispositivos FACTS são tratados na literatura em duas modalidades: (1) comportamento estático e (2) comportamento dinâmico. A modalidade estática é perfeitamente adaptável ao presente caso desta pesquisa. Em se tratando de considerar o comportamento dinâmico, há a necessidade de um desenvolvimento mais complexo, inclusive com reformulação (adaptação) completa envolvendo o desenvolvimento de uma função de Lyapunov (*like energy*) (AGHAEI et al., 2016), do modelo de sensibilidade etc. Este tema poderá ser tratado em outros estudos.

Observa-se que, na maioria dos casos abordados na literatura, o problema referente à melhoria da estabilidade transitória compreende o emprego de ações de controle baseado no redespacho da geração (e.g., VITTAL, 1989; VITTAL *et al.*, 1989; MINUSSI, 1990; MINUSSI; FREITAS, 1998; SONG; KEZUNOVIC, 2004) e, em casos extremos, recorrendo-se ao uso do corte de carga (SONG; KEZUNOVIC, 2004; MINUSSI *et al.*, 1990). Estas ações, invariavelmente, são de difícil aplicação, por exemplo, no redespacho da geração, as unidades geradoras, que são indicadas para produzir a melhoria da segurança, necessitam ter as suas gerações reduzidas. Para o atendimento pleno da demanda, em contrapartida, algumas unidades geradoras deverão aumentar a geração o que produz um efeito contrário. Por conseguinte, tem-se observado que o redespacho de geração tem proporcionado uma menor eficiência, se comparado ao reforço da transmissão. Além disso, o redespacho da geração constitui, quase sempre, numa ação de controle que oferece certa relutância por parte da operação, tendo em vista que resolve um problema, porém, pode causar outras adversidades operacionais, além de ser uma operação complexa. O corte de carga é bastante eficiente, porém, é algo que as empresas não desejam implementar por razões econômicas e por envolver parte dos consumidores no não atendimento de energia. Em se tratando do reforço da transmissão, são raras as contribuições disponíveis na literatura (SONG; KEZUNOVIC, 2004), nesse sentido, há a necessidade de serem encorajadas novas pesquisas. Como já mencionado previamente, o problema da melhoria de segurança dinâmica, abordada nesta pesquisa, refere-se a um processo baseado e evolutivo da referência Minussi e Freitas (1998) e inspirado, rudimentarmente, na publicação *interna corporis* de concurso de Livre Docência na UNESP, Câmpus de Ilha Solteira (MINUSSI, 1995).

Este texto encontra-se assim organizado. No Capítulo 2, apresentam-se o modelo da dinâmica do sistema, as principais propriedades e as definições mais relevantes associadas ao referido modelo. Apresenta-se, ainda, o cálculo da energia, como efetuar a análise da estabilidade transitória, baseada no conceito da margem de segurança e, uma breve exposição de como calcular a energia crítica do sistema. No Capítulo 3, ilustra-se uma aplicação considerando-se um sistema composto por máquina síncrona *versus* barra infinita com vistas a mostrar a melhoria da segurança do sistema quando realizado o reforço da transmissão (inclusão de LT), assim como, apresenta-se a formulação básica da melhoria da margem de segurança do sistema. Nos capítulos 4 e 5, são apresentados os cálculos da sensibilidade da margem de segurança, visando à melhoria da estabilidade, usando a ação de controle via reforço do sistema de transmissão. No Capítulo 6, são aprestados os resultados referentes aos experimentos realiza-

dos. Finalmente, no Capítulo 7, apresentam-se as principais conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 O MODELO DO SISTEMA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico de potência (SEP) é dito transitariamente estável se for capaz de manter o seu sincronismo quando sujeito a grandes perturbações, isto é, quando as máquinas que o compõem aceleram (ou desaceleram) simultaneamente após a eliminação do defeito. Segundo Anderson e Fouad (2002), o aumento indefinido da velocidade angular da MS, ou a presença de transitório oscilatório mesmo após a tentativa de correção da falha indicam a instabilidade do sistema. Assim faz-se necessária a formulação matemática que modela o comportamento do SEP em termos de sincronismo entre as máquinas, daí a importância de um modelo que descreva a evolução de cada máquina que compõe o sistema.

A análise da estabilidade transitória do SEP consiste em avaliar os efeitos de grandes perturbações sobre o estado da rede, nesta pesquisa serão consideradas as faltas do tipo curto-circuito. Em geral, o estudo da estabilidade é feito via solução numérica das equações que modelam o comportamento dinâmico do sistema e avaliação das curvas obtidas. No entanto, apesar de não haver restrições quanto à complexidade para este tipo de análise, o tempo de cálculo elevado e a necessidade da participação do usuário no processo de análise limitam a sua aplicação aos estudos de natureza *off-line*. Nesse sentido, torna-se mais interessante a aplicação do MD), que fornece o diagnóstico de estabilidade, tomando como base a energia do sistema, sem a necessidade da análise das equações diferenciais que descrevem o sistema.

Neste capítulo será abordado o modelo do sistema a ser adotado para fins da análise de estabilidade transitória dos sistemas de energia elétrica – trata-se do modelo clássico de primeira oscilação. Neste contexto, serão apresentados os conceitos de função de Lyapunov, superfície de energia e os principais teoremas e definições nos quais se baseiam o MDL.

## 2.2 O MODELO CLÁSSICO DE PRIMEIRA OSCILAÇÃO

O modelo adotado nesta tese refere-se ao chamado modelo clássico de primeira oscilação, considerando-se as várias hipóteses comumente empregadas na literatura especializada, ou seja, desconsideram-se os efeitos dos reguladores de tensão e de velocidade e, ainda, o efeito dos enrolamentos amortecedores. Tais hipóteses são aceitas na literatura quando se considera o tempo de simulação em torno de 1,5 segundo, não ultrapassando 2 segundos. Neste período, estas hipóteses são aceitas tendo em vista que as constantes de tempo, associadas aos reguladores, são pouco significativas no período de simulação considerado. Salienta-se que no período inicial é possível inferir, com bastante segurança, sobre a gravidade das perturbações que provocam grandes oscilações nas máquinas síncronas. Por exemplo, pode-se avaliar a extensão do impacto sobre o sistema por faltas do tipo curto-circuito. Usando-se o modelo clássico, de maneira geral, está-se analisando a estabilidade transitória de modo conservativo, ou seja, privilegia-se a situação mais crítica. Permitindo, assim, o desenvolvimento de uma metodologia que busque a melhoria da estabilidade transitória baseando-se na ação de controle via o reforço da transmissão (inclusão de linhas de transmissão). Esta abordagem abre a possibilidade do emprego, com as devidas adaptações, de dispositivos FACTS (HINGORANI, 1993).

O modelo adotado para esta pesquisa consiste de um modelo cuja referência é o Centro de Ângulos (CA) do sistema, transformando o sistema original de análise de sincronismo entre as máquinas em um problema de estudo da estabilidade de um novo sistema de equações diferenciais, equivalente ao estudo do sincronismo do sistema original. Esta formulação, de acordo com Pai (1981) é particularmente apropriada para abordagens que utilizam a função energia para o estudo da estabilidade transitória.

Define-se centro de ângulos (ou centro de inércia) de um sistema, composto de  $n$  máquinas síncronas, pela média das posições angulares dos geradores em relação à referência, ponderada pelas inércias das máquinas. Ou seja, sendo  $\delta_0$  o ângulo de referência, escreve-se (PAI, 1981):

$$\delta_0 = MT^{-1} \sum_{i \in N} M_i \delta_i \quad (1)$$

Em que  $N$  é o conjunto dos índices das MS,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $\delta_i$  é a posição angular da máquina síncrona medida em relação ao CA e  $M_i$ , definido por  $M_i = 2H_i/2\pi f_0$ .  $H_i$  é a constante de inércia e  $f_0$  é a frequência nominal do sistema em *hertz*.

Derivando-se a equação (1) em relação ao tempo, obtém-se a velocidade do centro de ângulos que é dada pela equação (2):

$$\dot{\delta}_0 = w_0 = MT^{-1} \sum_{i \in N} M_i w_i \quad (2)$$

Sendo  $w_i$  o desvio da velocidade angular da  $i$ -ésima MS com relação à velocidade do CA e  $MT$  definido pelo somatório das inércias da  $n$  máquinas síncronas que compõem o sistema, ou seja:

$$MT = \sum_{i \in N} M_i \quad (3)$$

Assim, considerando um SEP composto por  $n$  máquinas síncronas, o comportamento da  $i$ -ésima MS, referida ao CA e desprezadas as forças de amortecimento do sistema, é descrito pela seguinte equação diferencial (ANDERSON; FOUAD, 2002; MINUSSI; FREITAS, 1998; PAVELLA; ERNEST; RUIZ-VEGA, 2000) dada pela Equação (4):

$$M_i \ddot{\theta}_i - g_i(\boldsymbol{\theta}) = 0, \quad i \in N \quad (4)$$

sendo:

$$g_i(\boldsymbol{\theta}) = Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{MT} PCA \quad (5)$$

com:

$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T$  sendo que cada componente  $\theta_i$  indica a posição angular da  $i$ -ésima MS referida ao centro de ângulos, em radianos elétricos e é definida por:

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0. \quad (6)$$

A derivada da equação (6), com relação ao tempo, fornece a velocidade angular da  $i$ -ésima MS relativa ao centro de ângulos, que é dada por (7):

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 = w_i - w_0 = \omega_i \quad (7)$$

sendo  $w_0$  definido na equação (2).

$PCA$  é a potência acelerante do Centro de Ângulos, dada pela equação (8):

$$PCA = \sum_{j \in N} (Pm_j - Pe_j) \quad (8)$$

sendo:

$Pm_i$  : potência mecânica de entrada da  $i$ -ésima MS, dada em pu;

$N$  : conjunto de índices das MS que compõem o SEP,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ;

$Pe_i$  : potência elétrica entregue pela  $i$ -ésima MS e é expressa por (PAI, 1981):

$$Pe_i = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} (B_{ij}F_{ij} + C_{ij}H_{ij}) + E_i^2 C_{ii} \quad (9)$$

em que:

$$F_{ij} = E_i E_j \sin(\theta_{ij});$$

$$H_{ij} = E_i E_j \cos(\theta_{ij});$$

$$E_i : \text{módulo da tensão interna da } i\text{-ésima MS (pu);}$$

$$= \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j;$$

Os parâmetros  $C_{ij}$  e  $B_{ij}$  são a condutância e a susceptância de transferência, respectivamente, e correspondem à parte real e imaginária do  $ij$ -ésimo elemento da matriz de admitância de barra, reduzida às barras internas de geração ( $Y_{RED}$ ), calculada aplicando-se a redução de Kron, por meio da Equação (10), como feito em (VITTAL *et al.*, 1989; PAI, 1981; MINUSSI; DE FREITAS FILHO, 1998):

$$Y_{RED} \triangleq Y_{GG} - Y_{GL}ZY_{LG} \quad (10)$$

sendo:

$$Z = [Y_{LL}]^{-1}.$$



$Y_{GG}$ ,  $Y_{GL}$ ,  $Y_{LG}$  e  $Y_{LL}$  são as submatrizes que formam a matriz de admitância de barra, incluindo as barras internas, ( $Y_{baum}$ ), que é obtida considerando-se as cargas representadas por impedâncias (admitâncias) constantes que são adicionadas à matriz  $Y_{barra}$ , por conseguinte, nos nós de cargas são consideradas injeções de corrente nula. A matriz  $Y_{baum}$  é definida de acordo com a equação (11):

$$Y_{baum} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \quad (11)$$

sendo:

$Y_{baum}$  : matriz  $Y_{barra}$  aumentada (incluídas as barras internas de geração);

$G$  : índice indicando as barras internas de geração;

$L$  : índice indicando as barras de carga.

Na matriz  $Y_{LL}$ , os elementos da diagonal principal são obtidos pelo somatório das admitâncias conectadas ao nó e os elementos fora da diagonal principal são dados pelo valor das admitâncias entre os nós, com os sinais trocados.

O sistema de equações que modela o comportamento do SEP pode ser obtido pela substituição da equação (5) em (4) e pela equação (7). Assim, tem-se o sistema autônomo:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i \\ M_i \ddot{\theta}_i = Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{MT} PCA \end{cases} \quad i \in N \quad (12)$$

O modelo referido ao Centro de Ângulos, definido pela equação (4), apresenta as seguintes propriedades (PAI, 1981; MINUSSI, 1990):

**Propriedade 1:** No ponto de equilíbrio estável, a potência acelerante do CA é nula.

Para os estudos de estabilidade transitória, geralmente, são desprezados os efeitos dos torques de amortecimento e das potências assíncronas nas MS. Além disso, antes da ocorrência de falhas no SEP, considera-se que MS opera em regime estacionário. Nessas condições, a potência mecânica fornecida é igual à potência elétrica nos geradores e a máquina opera em velocidade síncrona. Tem-se então,  $Pm_i - Pe_i = 0$  para todas as MS que compõem o siste-

ma, o que equivale ao ponto de equilíbrio da equação (4). Desse modo, conclui-se que a *PCA* é nula quando avaliada nesse ponto. Sempre que houver deslocamento do estado em torno do ponto de equilíbrio, durante as oscilações eletromecânicas, a *PCA* será diferente de zero.

**Propriedade 2:** O somatório do produto da posição angular  $\theta$ , em relação ao centro de ângulos, pela inércia  $M$  de cada MS do sistema é igual a zero, ou seja,

$$\sum_{j=1}^n M_j \theta_j = 0 \quad (13)$$

Matematicamente, a expressão dada na Equação (13) equivale a dizer que os ângulos  $\theta_i$  são linearmente dependentes, o que também ocorre com as velocidades angulares das MS, conforme a propriedade 3.

**Propriedade 3:** O somatório do produto da velocidade angular  $\omega$  pela inércia das MS é nulo. Isto é,

$$\sum_{j=1}^n M_j \omega_j = 0 \quad (14)$$

As propriedades 2 e 3 asseguram que o conhecimento de  $n - 2$  variáveis de estado do sistema permite o cálculo das duas variáveis restantes utilizando-se as equações (13) e (14).

### 2.3 O MÉTODO DIRETO DE LYAPUNOV

O modelo matemático do SEP para a análise de estabilidade transitória é um sistema de equações diferenciais não lineares, autônomo e invariante no tempo (PAI, 1981) e que, portanto, não podem ser resolvidas de forma analítica (algébrica). Assim, para realizar a análise da estabilidade de tais sistemas geralmente avalia-se o seu comportamento em torno de seus pontos de equilíbrio. Matematicamente, existem formas diferentes de se definir a estabilidade/instabilidade de um sistema de equações. Para esta pesquisa, será considerada a definição de estabilidade em consonância com o MDL.

Avaliar a estabilidade de um sistema elétrico equivale a avaliar a estabilidade do sistema de equações (12), que pode ser representado, genericamente, pela Equação (15):

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) \quad (15)$$

Sendo que  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  e  $f(\mathbf{x}), f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ , é uma função vetorial que atende às condições de Lipschitz, o que assegura existência, unicidade e prolongabilidade das soluções até  $+\infty$ .

**Definição 1** : Um ponto  $\mathbf{x}^e$  é dito um **estado de equilíbrio** do sistema (15) se, e somente se,  $f(\mathbf{x}^e) = 0$ .

Supõe-se, sem perda de generalidade, que  $\mathbf{x}^e = 0$ , ou seja,  $f(\mathbf{0}) = 0$ . Portanto, a função  $\mathbf{x}(t) = 0$  é uma solução de (15). Caso  $\mathbf{x}^e \neq 0$ , basta fazer uma mudança de variável. Nesta pesquisa avalia-se a estabilidade em uma vizinhança do ponto de equilíbrio.

Afirmar que um ponto  $\mathbf{x}^e$  é um ponto de equilíbrio do sistema (15) significa dizer, em outras palavras, que não há tendências a uma mudança de comportamento da função  $f(\mathbf{x})$ . Em se tratando do sistema elétrico, é equivalente a afirmar que não há tendência a uma mudança de estado deste em torno desse estado do equilíbrio.

**Definição 2**: Um estado  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$  é definido como **estado inicial** ou **condição inicial** para a evolução de uma solução do sistema (15).

Para realizar a análise da estabilidade transitória do SEP será utilizada uma função do tipo energia total do sistema como função de Lyapunov, de forma que a rede é descrita por superfícies de energia. Assim, considerando um ponto  $\mathbf{x}_0$  sobre essa superfície como condição inicial para o sistema (15), o sistema evoluirá, a cada instante, se estável, para níveis de energia cada vez mais baixos até alcançar o ponto de equilíbrio.

**Definição 3 :** (FIQUEIREDO, 2008) Seja  $V: \Omega \in \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  uma função cujas derivadas parciais existem e são contínuas, definida em um conjunto aberto  $\Omega$ . Diz-se que  $V$  é uma **função de Lyapunov** para um sistema dado pela Equação (15) quando:

$$\begin{aligned} V(\mathbf{0}) = 0, \quad V(\mathbf{x}) > 0, \text{ se } \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \text{ e} \\ \dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall \mathbf{x} \end{aligned} \tag{16}$$

Sendo  $\dot{V}: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  definida por  $\dot{V} = \langle \nabla V(\mathbf{x}), f(\mathbf{x}) \rangle$ .

No caso em que  $\dot{V} < 0$ , para  $\mathbf{x} \neq 0$ , diz-se que  $V$  é uma **Função de Lyapunov Estrita**. Além disso,  $\dot{V} = 0$  indica conservação de energia por parte do sistema e  $\dot{V} < 0$  indica dissipação de energia (MINUSSI; DE FREITAS FILHO, 1998).

Considerando a origem como o ponto de equilíbrio do sistema (15), define-se a **estabilidade no sentido de Lyapunov** como:

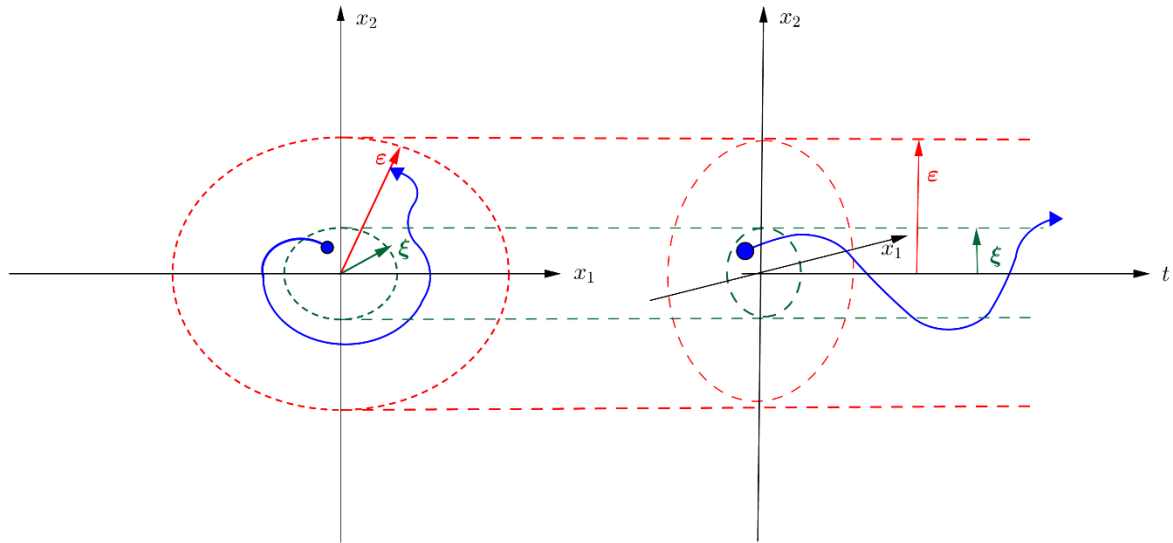
**Definição 4 :** Um estado  $\mathbf{x}^e$  do sistema (15) é estável no sentido de Lyapunov, se para todo  $\epsilon > 0$  existe uma vizinhança, em torno de  $\mathbf{x}^e$ ,  $\xi > 0$ , tal que:

$$\|\mathbf{x}^e\| \leq \xi \Rightarrow \|\mathbf{x}(t)\| \leq \epsilon, \quad \forall t \geq 0 \tag{17}$$

sendo  $\|\cdot\|$  é uma norma em  $\mathbb{R}^n$ .

Em resumo, se um ponto  $\mathbf{x}^e$  é estável, no sentido de Lyapunov, qualquer trajetória que se inicia suficientemente próxima de  $\mathbf{x}^e$  (dentro da vizinhança  $\xi$ ) permanece tão próxima ao ponto de equilíbrio quanto se queira, conforme pode ser observado na Figura 1.

**Figura 1** - Estabilidade segundo Lyapunov.



**Fonte:** Adaptado de Torres (2017).

Outra forma de definir estabilidade segundo Lyapunov é considerando a existência de uma função de Lyapunov para a origem do sistema.

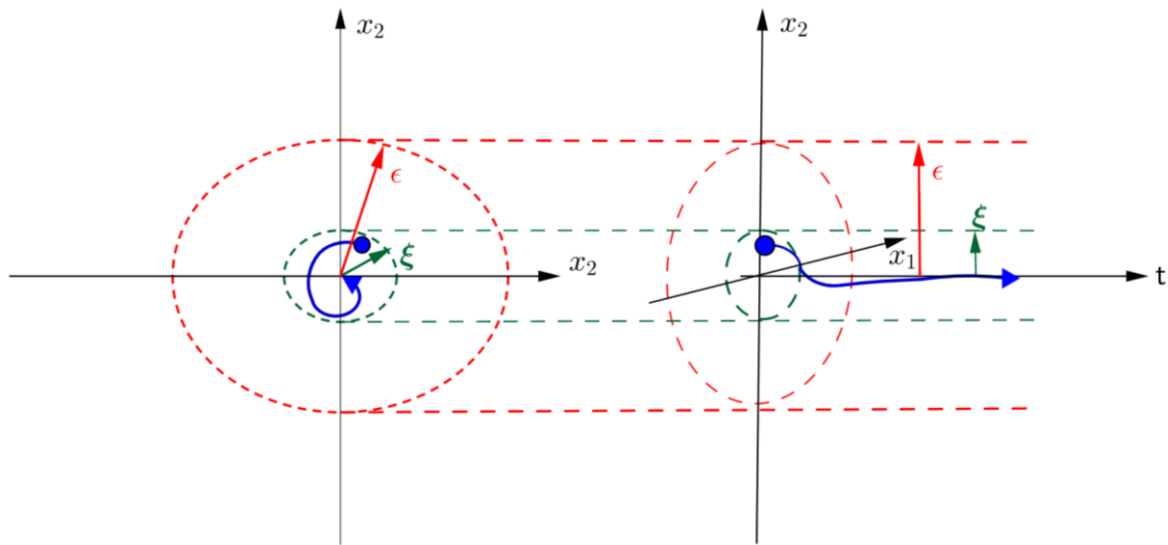
**Definição 5:** Se para a origem do sistema existir uma função de Lyapunov, então,  $\mathbf{x}^e = 0$  é estável no sentido de Lyapunov.

**Definição 6: Estabilidade Assintótica** – o estado  $\mathbf{x}^e = 0$  é dito assintoticamente estável (Figura 2) se  $\mathbf{x}^e$  é estável no sentido de Lyapunov e se:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t) = 0. \quad (18)$$

Se um ponto de equilíbrio  $\mathbf{x}^e$  é assintoticamente estável, qualquer trajetória  $\mathbf{x}(t)$  começando próximo a  $\mathbf{x}^e$  (dentro da vizinhança  $\xi$ ) permanecerá próxima ao ponto de equilíbrio e convergirá para ele à medida que  $t$  cresce (Figura 2).

**Figura 2** - Estabilidade assintótica.

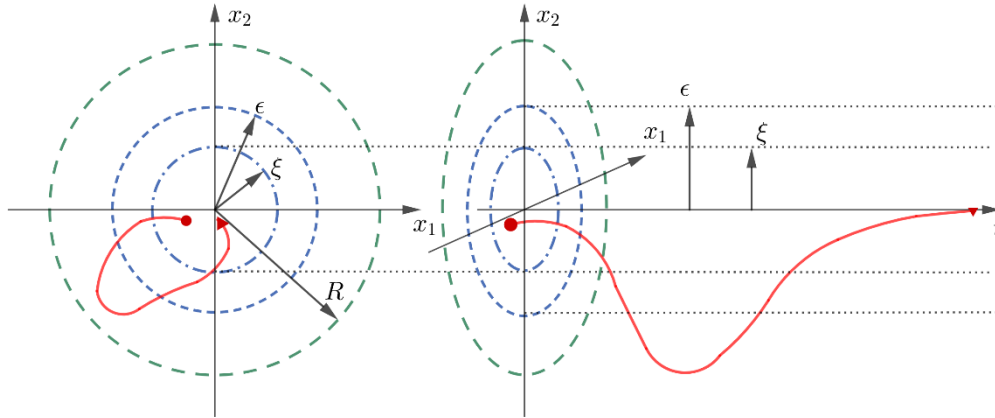


**Fonte:** Adaptado de Torres (2017).

**Definição 7 :** Se um ponto de equilíbrio  $x^e$  não é estável, no sentido de Lyapunov, então  $x^e$  é dito **instável**.

É importante ressaltar que a definição de estabilidade/instabilidade no sentido de Lyapunov é uma condição local, isto porque são avaliados os comportamentos das soluções do sistema dinâmico em uma vizinhança do ponto de equilíbrio, não havendo informações suficientes para afirmar sobre a estabilidade/instabilidade fora da vizinhança analisada. A Figura 3 mostra um sistema cuja trajetória extrapola a região  $\xi$ , portanto não atende às condições para estabilidade segundo Lyapunov e que, no entanto, converge para o ponto de equilíbrio.

**Figura 3** - Instabilidade no sentido de Lyapunov.



**Fonte:** Adaptado de Torres (2017).

De acordo com Pai (1981), para estudos de estabilidade de sistemas não lineares a definição de estabilidade assintótica é limitada, no sentido de que não é possível estimar o impacto de uma perturbação sobre o comportamento do sistema, dependendo de sua gravidade. Isto é, não há garantias de que, uma vez tendo sofrido uma grande perturbação, o sistema retorne à estabilidade fazendo com que todas as trajetórias subsequentes converjam para a origem. Nesse sentido, um conceito mais importante para a estabilidade dos sistemas não lineares é a definição de **Estabilidade Assintótica Global**:

**Definição 8** : Um sistema é dito **Globalmente Assintoticamente Estável** se é assintoticamente estável para todo  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  e se, quando  $t \rightarrow \infty$ , tem-se:

$$\|\mathbf{x}(t)\| \rightarrow 0, \forall \mathbf{x}(t_0) \in \mathbb{R}^n \quad (19)$$

A definição 8 equivale a dizer que, se um sistema é global e assintoticamente estável, qualquer trajetória começando em qualquer ponto do seu domínio tende para a origem quando  $t$  tende para o infinito. Diferente da definição de estabilidade assintótica, a estabilidade assintótica global não se limita a uma vizinhança do ponto de equilíbrio.

A análise da estabilidade transitória pelo MDL do sistema (12) consiste na determinação de uma **Região de Atração** ou **Domínio de Estabilidade** em torno do ponto de equilíbrio estável pós-falta na qual se encontra  $tcrit_r$ . Isso é realizado por meio da construção de uma função de Lyapunov para o sistema pós-falta e definindo-se uma região  $\Omega$  determinada pela inequação  $V(\mathbf{x}) < C$ , sendo  $C$  uma constante arbitrária, de forma que, no interior de  $\Omega$ ,  $V(\mathbf{x}) > 0$  e  $\dot{V}(\mathbf{x}) < 0$  (PAI, 1981).

A eficiência desse tipo de análise depende da qualidade de  $V(\mathbf{x})$  e da forma como a região  $\Omega$  está definida, quanto melhor a aproximação de  $tcrit_r$ , maior a acurácia dos resultados. Assim, a partir de uma condição inicial  $\mathbf{x}_0$ , calcula-se  $V(\mathbf{x}_0)$ , que é o valor da função de Lyapunov no ponto  $\mathbf{x}_0$  e avalia-se a estabilidade transitória do sistema verificando-se o seguinte critério:

- a. Se  $V(\mathbf{x}_0) < V(\mathbf{x}^*)$ , o sistema é estável em torno de  $\mathbf{x}_0$ ;
- b. Se  $V(\mathbf{x}_0) \geq V(\mathbf{x}^*)$ , o sistema é instável.

Onde  $\mathbf{x}^*$  é a solução do problema de programação não linear apresentado na Equação (20):

$$\begin{aligned} & \text{Min } V(\mathbf{x}) \\ & \text{s.a. } \dot{V}(\mathbf{x}) = 0 \end{aligned} \tag{20}$$

Define-se então o domínio de estabilidade como a região dada pela expressão apresentada na equação (21):

$$\mathbb{D} = \{\mathbf{x} / V(\mathbf{x}) < V(\mathbf{x}^*)\} \tag{21}$$

## 2.4 A FUNÇÃO ENERGIA

O Método Direto de Lyapunov é bastante eficaz para a análise de estabilidade dos SEP, tendo em vista não ser necessário conhecer as soluções das equações que modelam o sistema. No entanto, uma das grandes dificuldades de aplicar o MDL é a necessidade de construir uma função que seja adequada e que satisfaça as condições do teorema de Lyapunov. Nesta pesquisa será empregada, para a análise de estabilidade do SEP, uma função de Lyapunov do tipo energia, especificamente, a função de energia total do sistema.



As funções de Lyapunov do tipo energia nas condições pós-falta do sistema elétrico são usadas para obter a energia crítica ( $E_{crit_r}$ ) do sistema, que é a energia máxima que o sistema pode absorver (AGHAEI et al., 2016) até o instante ( $t_{crit_r}$ ), ou tempo crítico, que é o instante em que ocorre a falha.

A função energia associada ao sistema (12) pode ser expressa pela Equação (22) (PAI, 1981; FONSECA; DECKER, 1985; FOUAD; VITTAL, 1992):

$$E(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i \in N} M_i \omega_i^2 - \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} g_i(\boldsymbol{\theta}) d\theta_i \quad (22)$$

O primeiro termo da equação (22) determina a **Energia Cinética** ( $E_c$ ) do SEP e o segundo termo determina a **Energia Potencial** ( $E_p$ ), ou seja:

$$E_c(\boldsymbol{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i \in N} M_i \omega_i^2 \quad (23)$$

e,

$$E_p(\boldsymbol{\theta}) = - \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} g_i(\boldsymbol{\theta}) d\theta_i \quad (24)$$

O sobrescrito  $p$  representa o estado de equilíbrio pós-falta do sistema e a função  $g(\boldsymbol{\theta})$  é definida pela Equação (5).

A função energia corresponde a primeira integral da equação do movimento. A equação do movimento, na mecânica clássica, é definida como sendo o somatório do produto de  $[(M_i \ddot{\theta}_i - g_i(\boldsymbol{\theta}))]$  por  $\omega_i$ , para  $i \in N$ . Esta integral será igual a uma constante que é definida como sendo a energia total do sistema, portanto, a energia total de um sistema conservativo se mantém constante no período transitório (período observado a partir do instante da eliminação da falta de curto-circuito). O sistema é considerado conservativo, visto que se despreza o amortecimento (sem a atuação dos enrolamentos amortecedores).

Assim, pode-se reescrever a equação (22) como:

$$E(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}) = E_c(\boldsymbol{\omega}) + E_p(\boldsymbol{\theta}) \quad (25)$$

Considerando-se as propriedades das coordenadas do centro de ângulos, definido na Equação (1), pode-se reescrever a equação da função energia da seguinte forma:

$$E(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}) = Ec(\boldsymbol{\omega}) - \sum_{i \in N} Pm_i(\theta_i - \theta_i^p) + \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} Pe_i(\boldsymbol{\theta}) d\theta_i. \quad (26)$$

Como é possível observar, pela equação (26) e pelas propriedades 2 e 3 da formulação do modelo referido ao centro de ângulos, a potência acelerante (PCA) não oferece nenhum impacto sobre a função energia, isto porque:

$$\sum_{i \in N} \frac{M_i}{MT} PCA \dot{\theta}_i = \frac{PCA}{MT} \sum_{i \in N} M_i \dot{\theta}_i = 0 \quad (27)$$

Observa-se que, ao serem consideradas as condutâncias de transferência, a Equação (24) consiste de uma integral que depende do caminho e que, a não ser que a trajetória do sistema seja conhecida, não pode ser calculada numericamente. Nesse sentido, para calcular a energia total do sistema é necessário buscar alternativas a fim de lidar com essa particularidade. Existem algumas alternativas para a sua solução calculada (MINUSSI, 1990; MINUSSI; DE FREITAS FILHO, 1998), por exemplo:

- a) Desprezam-se os efeitos das condutâncias de transferência. Nesse caso, é necessário realizar ajustes a fim de tornar o modelo mais consistente, já que a medida que o sistema evolui são introduzidos erros nas soluções encontradas, que são crescentes com o aumento do carregamento do sistema. Como alternativa para reestabelecer o equilíbrio do sistema pode-se executar a correção de potência mecânica de entrada do sistema como feito por Ribbens-Pavella e Evans (1985), ou ainda, assumir a potência mecânica de entrada constante, nesse caso seria necessário determinar um novo ponto de equilíbrio do sistema desconsiderando as condutâncias de transferência, como foi proposto por Fonseca e Decker (1985);
- b) Usando formas aproximadas da integral para o cálculo. Nesse sentido, podem-se considerar apenas as partes das condutâncias de transferência que permitem agrupar os termos da função energia que podem ser integrados, ou de forma al-

ternativa, incluir os efeitos das condutâncias aplicando-se técnicas de análise de perturbações. É possível ainda assumir que o caminho de integração é linear e aplicar, por exemplo, a regra trapezoidal para resolver a integral.

- c) Avaliar a integral à medida que se conhece a evolução dos ângulos e as velocidades das máquinas obtendo-se, dessa forma, pontos da trajetória do sistema através dos quais é possível determinar o caminho de integração entre eles. Se o caminho de integração entre dois pontos é conhecido é possível calcular o valor da integral nesse caminho.

As alternativas (a) e (b) podem ocasionar erros na solução obtida, por isso neste trabalho a função energia é calculada de acordo com a alternativa (c).

## 2.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Segundo a definição do IEEE, um sistema de potência é **estável do ponto de vista de estabilidade transitória** para uma condição de operação em um regime estacionário particular e para uma grande perturbação se, após a ocorrência da perturbação, o sistema é capaz de alcançar um estado de operação aceitável (IEEE POWER SYSTEM ENGINEERING COMMITTEE et al., 1982). Para esta pesquisa serão consideradas perturbações do tipo curto-circuito.

O diagnóstico da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência, considerando uma contingência de índice  $r$ , pode ser realizado utilizando o critério da Margem de Segurança (MINUSSI; DE FREITAS FILHO, 1998; PAVELLA; ERNEST; RUIZ-VEGA, 2000).

A margem de segurança pode ser interpretada como a “distância” que o ponto de operação se encontra do ponto de instabilidade. Assim, define-se a margem de segurança para a  $r$ -ésima contingência pela equação (28):

$$\mathcal{M}r \stackrel{\text{def}}{=} \frac{E_{crit_r} - Ee_r}{E_{crit_r}} \quad (28)$$

sendo:

$\mathcal{M}r$  : Margem de segurança para a  $r$ -ésima contingência;

$E_{crit_r}$  : Energia Crítica do Sistema;

$Ee_r$  : Energia Total do Sistema ( $E(\omega, \theta)$ ) associada à contingência  $r$ , calculada no instante de eliminação da falta (defeito) ( $te$ ).

A Energia Crítica ( $E_{crit_r}$ ) e o Tempo Crítico ( $tcrit_r$ ) são calculados via MDL (PAVELLA; ERNEST; RUIZ-VEGA, 2000; MARTINEZ-VELASCO, 2015) por qualquer método disponível na literatura. Pode-se concluir sobre a estabilidade/instabilidade do SEP, sujeito a uma contingência  $r$ , avaliando o valor de  $\mathcal{M}_r$ , sendo o sistema estável, do ponto de vista da estabilidade transitória, se  $\mathcal{M}_r > 0$  ou instável caso contrário ( $\mathcal{M}_r \leq 0$ ).

Para as simulações realizadas, foi aplicado o método PEBS (*Potential Energy Boundary Surface*) (Superfície de limite de energia potencial) (ATHAY *et al.*, 1979), para o cálculo da energia crítica, que consiste num arranjo baseado na observação da energia total e da seguinte expressão:

$$D = \langle \mathbf{g}(\theta), (\theta - \theta^p) \rangle \quad (29)$$

Sendo  $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle$  o produto interno entre os vetores  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$  de mesma dimensão.

A função (parâmetro) escalar  $D$  se mantém sempre com o valor negativo no interior da região de estabilidade, assim para uma trajetória estável,  $D$  será sempre negativo. Se, no entanto, ocorre pelo menos uma vez a mudança de sinal de  $D$ , a trajetória é dita instável. Por conseguinte, o valor estimado da energia total crítica é determinado, via sucessivas aproximações, considerando-se duas energias totais de referência: energia total máxima ( $Emáx$ ) e energia total mínima ( $Emín$ ).  $Emáx$  e  $Emín$  correspondem, respectivamente, às energias externa e interna à região de estabilidade. A energia crítica é considerada como sendo  $Emín$ , quando for minimizada a distância entre  $Emáx$  e  $Emín$ . Este processo, a menos de uma tolerância, é totalmente preciso considerando o modelo clássico. Por isso a adoção deste método nesta pesquisa. Contudo, observa-se que a metodologia desenvolvida nesta pesquisa não é dependente do método PEBS, podendo ser usado outro método por livre escolha do usuário, desde que ofereça resultados precisos.

## 2.6 CONCLUSÃO CAPITULAR

Neste capítulo, foi apresentado o modelo do comportamento dinâmico do sistema de energia elétrica associado às máquinas síncronas. Este modelo, chamado modelo clássico de primeira oscilação, se mostrou bastante vantajoso para os propósitos desta pesquisa que propõe um modelo de sensibilidade em relação ao reforço da transmissão oferecendo rapidez na realização dos cálculos e precisão, sob o controle do usuário.

A análise da estabilidade transitória, nesta tese, será realizada via o emprego do aplicativo SIMUL. Trata-se de uma implementação computacional, em código FORTRAN, que foi desenvolvida no laboratório SINTEL (Sistemas Inteligentes) do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP – Campus de Ilha Solteira. O aplicativo SIMUL, basicamente, é composto pelo cálculo de fluxo de potência (método de Newton desacoplado rápido) (STTOT, 1972) e o método da energia, em consonância com a proposição do método PEBS. Esta metodologia apresenta alta precisão (podendo ser controlada em função da exigência do usuário) e eficiência computacional (rapidez), considerando-se o modelo clássico de primeira oscilação conforme o modelo da dinâmica do sistema apresentado neste capítulo. Esta foi a razão do desenvolvimento do aplicativo SIMUL. Além disso, levando-se em conta o fato de o SIMUL ser uma arquitetura aberta, é possível extrair uma série de informações que são necessárias para a obtenção do modelo de sensibilidade aqui proposto. Contudo, o método proposto, nesta tese, não está comprometido com o método PEBS, podendo ser usadas outras implementações, desde que proporcionem, principalmente, a precisão dos resultados visando não prejudicar o desenvolvimento do modelo de análise de sensibilidade, como será exposto em capítulo subsequente desta tese.

### 3 A MELHORIA DA ESTABILIDADE BASEADA NA MUDANÇA DE IMPEDÂNCIA NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Grandes perturbações no SEP podem ocasionar a perda de estabilidade dos equipamentos que o compõem. Nesse sentido, deve-se avaliar a gravidade dos impactos causados pelas falhas considerando uma lista de contingências. Com o objetivo de garantir a retomada da estabilidade dinâmica pelo SEP, após a ocorrência de falhas, é apresentado nesta pesquisa uma proposta de alteração no sistema de transmissão, baseada na análise da sensibilidade dos elementos da rede elétrica em relação aos elementos a serem retirados/incluídos.

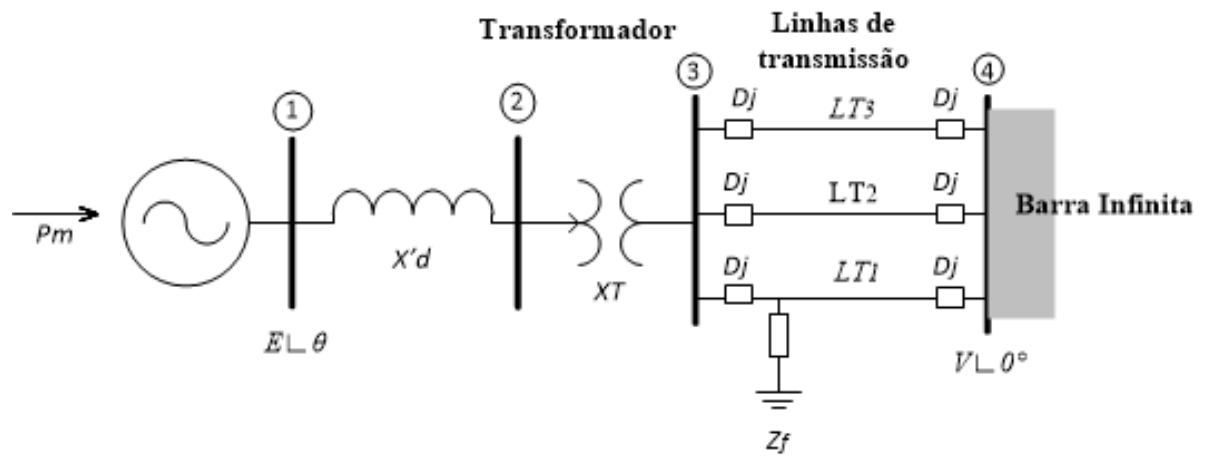
Neste capítulo, serão apresentadas as condições para a realização das alterações no sistema de transmissão, nesse caso, entrada/saída de linhas de transmissão, de forma a garantir a melhoria da estabilidade dinâmica do SEP. As alterações na rede de transmissão ocasionam mudanças no funcionamento das MS. Dessa forma, é necessário estabelecer condições para garantir a escolha da melhor alternativa para essa ação e isso é realizado via análise da sensibilidade da margem de segurança do sistema e dos seus elementos.

#### 3.2 A MELHORIA DA SEGURANÇA BASEADA NO MÉTODO DA IGUALDADE DE ÁREAS

Visando ilustrar a influência do reforço da transmissão na estabilidade transitória, inicialmente, apresenta-se um sistema composto por uma máquina síncrona alimentando uma barra infinita via linhas de transmissão ( $LT_1$ ,  $LT_2$  e  $LT_3$ ), como mostrado na Figura 4. O experimento é assim planejado: (1) analisa-se primeiramente, o caso em que se emprega a alimentação da barra infinita por 2 linhas de transmissão ( $LT_1$  e  $LT_2$ ); (2) faz-se o reforço da transmissão incluindo a  $LT_3$ .

Ocorre um curto-circuito na linha  $LT_1$  próxima a barra 3 com o ajuste da proteção para atuar em 9 ciclos de tempo ( $te$ ) para uma frequência de 60 Hz, ou seja,  $te = 0,15s$ . Após a atuação da proteção, a  $LT_1$  sairá definitivamente de operação.

**Figura 4** - Sistema Elétrico composto por um gerador e uma barra infinita.



**Fonte:** Elaborado pela autora.

sendo:

$x'd$  : reatância transitória de eixo direto do gerador (máquina síncrona);

$E \angle \theta$  : tensão interna da máquina síncrona;

$V \angle 0^\circ$  : tensão na barra infinita;

$P_m$  : potência mecânica de entrada na máquina síncrona;

$X_T$  : reatância de dispersão do transformador;

$LT_i$  :  $i$ -ésima linha de transmissão;

$D_j$  : disjuntor;

$Z_f$  : impedância de falta referente a um curto circuito trifásico;

$te$  : tempo de eliminação da falha (atuação dos disjuntores).

Os valores dos parâmetros adotados, neste experimento, são:

$$x'd = 0,05 \text{ pu}$$

$$X_T = 0,10 \text{ pu}$$

$$P_m = 2 \text{ pu}$$

$f$  : frequência nominal do sistema

$$= 60 \text{ Hz};$$

$H$  : constante de inércia

$$= 6 \text{ s}$$

$$M = 0,0318 (2 H / (2\pi f))$$

Nas linhas de transmissão, são desconsiderados, para fins de simplificação, a resistência, a admitância “shunt” e o efeito dos enrolamentos amortecedores de eixos diretos e de quadratura. Este modelo tem sido bastante usado na literatura especializada não causando discrepâncias expressivas nos resultados. Neste caso, as reatâncias de  $LT_1$ ,  $LT_2$  e  $LT_3$  são adotadas iguais a 0,20 pu. Considera-se, inicialmente, a operação com as duas LT:  $LT_1$  e  $LT_2$ , e um curto-circuito trifásico sólido ( $Z_f = 0$  pu). Considera-se, também,  $E = V = 1$  pu. A análise da estabilidade deste sistema pode ser realizada mediante o emprego do Método da Igualdade de Áreas (MIA) (ANDERSON; FOUAD, 2002), o qual consiste na seguinte análise:

- Se  $A1 > A2$ , instabilidade transitória;
- Se  $A1 = A2$ , limite de estabilidade transitória;
- Se  $A1 < A2$ , estabilidade transitória, e, então,  $\exists A2' = A1$ .

Baseadas nestas informações, são obtidos os seguintes resultados:

$$P_{max} = EV/x_{eq};$$

$$P_{e^a} = P_{max^a} \text{sen}(\theta);$$

$$P_{e^f} = P_{max^f} \text{sen}(\theta);$$

$$P_{e^p} = P_{max^p} \text{sen}(\theta);$$

$$P_{max^a} = 4 \text{ pu};$$

$P_{max^f} = 0$  pu (por causa do curto-circuito sólido ( $Z_f = 0$ ) na  $LT_1$  próximo ao barramento 4);

$$P_{max^p} = 2,8571 \text{ pu};$$

$x_{eq}$  : reatância equivalente entre os nós 1 e 2.

Sendo que os índices ( $a$ ), ( $f$ ) e ( $p$ ) denotam as condições antes da falta (operação de  $LT_1$  e  $LT_2$ ), durante o curto-circuito e pós-falta (saída de operação da  $LT_1$  e consequente eliminação do curto-circuito), respectivamente. O ângulo  $\theta(t)$ , durante o período do curto-



circuito entre  $0 < t \leq te$ , tendo em vista que  $Pmax^f = 0$  pu, é calculado do seguinte modo (via resolução simples da equação diferencial (4):

$$\theta(t) = \theta^a + \left[ \frac{Pm}{2M} \right] te^2 \quad (30)$$

As áreas de aceleração ( $A1$ ) e de desaceleração ( $A2$ ), respectivamente, são expressas por:

$$A1 = Pm[\theta(te) - \theta^a] \quad (31)$$

$$A2 = -Pm[\pi - \theta^p - \theta(te)] - Pmax^p[\cos(\pi - \theta^p) - \cos \theta(te)] \quad (32)$$

Os pontos de equilíbrio (estáveis e instáveis) associados a este experimento, são dados por ( $Pm - Pe = 0$ ), o ângulo  $\theta(te)$  é dado por:

$$\begin{aligned} \theta^a &= \text{sen}^{-1}(Pm / Pmax^a) \\ &= 0,5235 \text{ radiano elétrico (30}^\circ\text{);} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta^p &= \text{sen}^{-1}(Pm / Pmax^p) \\ &= 0,7754 \text{ radiano elétrico (44,4278}^\circ\text{);} \end{aligned}$$

$$\theta(te) = 1,2305 \text{ radiano elétrico (70,50}^\circ\text{), para } te = 0,15\text{s (9 ciclos de 60 Hz).}$$

Nestas condições, aplicando-se o MIA, são obtidos os seguintes resultados, ilustrados na Figura 5:

$$\begin{aligned} A1 &= Pm[\theta(te) - \theta^a] \\ &= 1,4137; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A2 &= -Pm[\pi - \theta^p - \theta(te)] - Pmax^p[\cos(\pi - \theta^p) - \cos \theta(te)] \\ &= 0,7226. \end{aligned}$$

Em se tratando da análise por meio das áreas de aceleração e de desaceleração, a margem de segurança ( $\mathcal{M}$ ), ajustada a este caso, pode ser expressa pela Equação (33):

$$\mathcal{M} = \frac{(A2 - A1)}{A1} \quad (33)$$

portanto, no exemplo,  $\mathcal{M} = -0,4889$ .

Este valor indica que o sistema é instável (do ponto de vista transitório), ou seja, possui uma margem de segurança negativa.

Com o objetivo de melhorar a estabilidade transitória do sistema, considera-se a entrada em operação de uma terceira linha de transmissão. São apresentados, a seguir, os resultados da análise da estabilidade transitória após a aplicação do reforço da transmissão com a inclusão da  $LT_3$  paralelamente em relação a  $LT_1$  e  $LT_2$ . As demais condições são as mesmas: curto-circuito na  $LT_1$  próximo à barra 3 com tempo de eliminação da falta  $te = 9$  ciclos. Após este tempo ( $te$ ), a  $LT_1$  definitivamente ficará fora de serviço. Os novos pontos de operação e áreas de aceleração ( $A1'$ ) e de desaceleração ( $A2'$ ), são dados pelos seguintes valores:

$$\theta^{a'} = 0,4482 \text{ radiano elétrico } (25,6798^\circ);$$

$$\theta^{p'} = 0,5235 \text{ radiano elétrico } (30^\circ);$$

$$\theta'(te) = 1,1551 \text{ radiano elétrico } (66,1798^\circ), \text{ para } te = 0,15s$$

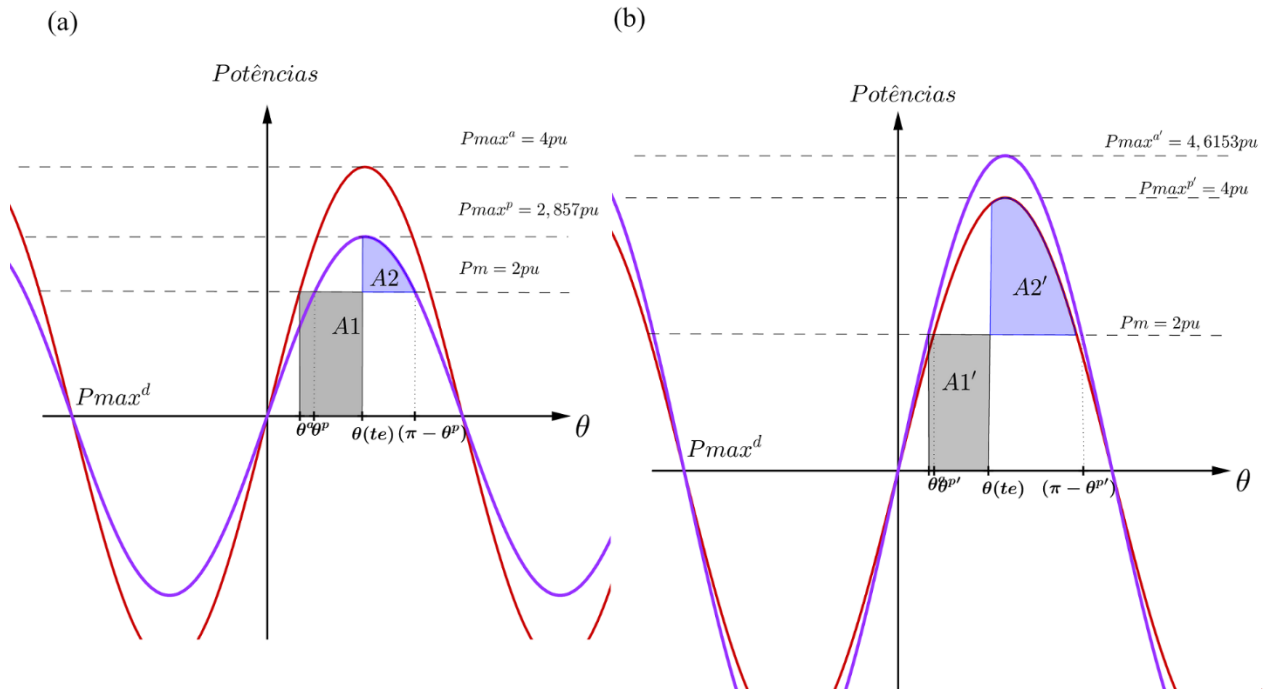
$$A1' = 1,4137;$$

$$A2' = 2,1533;$$

$$\mathcal{M} = 0,5234.$$

Na Figura 5 são apresentadas as curvas de potências durante a operação do sistema para considerando-se, na Figura 5(a), a operação de duas linhas de transmissão e, na Figura 5(b), a operação de três linhas de transmissão. É possível observar a melhoria da estabilidade transitória, baseado no critério da igualdade entre áreas, já que a área de desaceleração sofre uma redução enquanto que a área de aceleração aumenta após a aplicação do reforço da transmissão.

**Figura 5** - Aplicação do critério da igualdade de áreas para a análise de estabilidade transitória: (a) 2 LT's em operação e (b) 3 LT's em operação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Deste modo, observa-se que com o reforço da transmissão (inclusão da LT<sub>3</sub>) houve um deslocamento da margem de segurança ( $\mathcal{M}$ ) de  $-0,4889$  (situação instável do ponto de vista da estabilidade transitória) para  $0,5234$  (estabilidade no *stricto sensu*). Este será o procedimento usado na sequência (Capítulo 5) visando à melhoria da segurança baseada na análise de sensibilidade com vistas a se propor as melhores soluções de linhas de transmissão a ser incorporadas no sistema, levando-se em conta a análise da estabilidade transitória associada a grandes perturbações correspondente a curto-circuito trifásico.

### 3.3 O CRITÉRIO DA MARGEM DE SEGURANÇA

Para realizar o reforço da transmissão, é necessário avaliar o impacto causado por essa mudança antes mesmo que ela seja executada a fim de que a estabilidade dinâmica do sistema seja garantida após a ocorrência das falhas. Neste trabalho, essa avaliação é realizada via análise da sensibilidade da margem de segurança, considerando a sua derivada em relação à sus-

ceptância da LT a ser incluída permitindo dessa forma, mensurar o impacto da LT adicionada sobre o comportamento dinâmico do SEP.

Assim, considerando uma lista de  $S$  contingências, deve-se estabelecer critérios para avaliar se tais contingências tornam, ou não, o sistema inseguro. Assim, considerando-se  $\mathcal{M}_r$  a margem de segurança associada à contingência  $r$ , determina-se que a margem de segurança do sistema, denotada por  $\mathbb{M}$ , e definida como o valor mínimo entre as margens de segurança associadas às contingências (Equação (34)) fique limitada a um valor mínimo permissível que será denotado por  $\mathcal{M}_{min}$  e que deve ser um número maior que zero. Para esta pesquisa, será estabelecida a margem de segurança mínima permissível igual a 0,3. Esse valor foi estabelecido, considerando os experimentos que foram realizados, por ser o melhor valor a ser adotado para os sistemas estudados. Assim sendo, a margem de segurança do sistema elétrico dada por:

$$\mathbb{M} = \text{Min}(\mathcal{M}_r) \quad (34)$$

ela deve satisfazer, para uma lista de  $S$  contingências, a seguinte desigualdade:

$$\mathbb{M} > \mathcal{M}_{min} \quad (35)$$

Com o modelo apresentado, analisa-se a sensibilidade da margem de segurança do sistema visando, então, propor as alterações necessárias para a melhoria da estabilidade. As ações propostas tratam da alteração da impedância do sistema de transmissão por meio da inclusão de um elemento (linha de transmissão). Para isso, avalia-se a sensibilidade da margem de segurança que será discutida a seguir.

Considerando a inclusão de uma linha de transmissão  $l(u, v)$ , deve-se observar a seguinte relação:

$$\mathcal{M}_r + \Delta\mathcal{M}_r \geq \mathcal{M}_{min}, \quad r = 1, 2, \dots, S \quad (36)$$

sendo:

$\Delta\mathcal{M}_r$  representa a contribuição de  $l(u, v)$  para a estabilidade da rede.

Reescrevendo a inequação (36), obtém-se:

$$\Delta\mathcal{M}_r \geq \mathcal{M}_{min} - \mathcal{M}_r \quad (37)$$

O valor de  $\Delta\mathcal{M}_r$  pode ser estimado, em função da susceptância  $B_l$ , via análise de sensibilidade de primeira ordem pela relação (SALTELLI; CHAN; SCOTT, 2000):

$$\Delta\mathcal{M}_r \cong \left\langle \frac{\partial\mathcal{M}_r}{\partial B_l}, \Delta B_l \right\rangle \quad (38)$$

sendo:

$l(u, v)$  : elemento do sistema de transmissão de índice  $l$  com barras terminais  $u$  e  $v$  e admitância  $B_l$ ;

$\frac{\partial\mathcal{M}_r}{\partial B_l}$  : sensibilidade da MS associada à  $r$  – ésima contingência com relação à susceptância  $B_l$ ;

$\Delta B_l$  : acréscimo na admitância do elemento  $l(u, v)$ .

A partir da Equação (38), pode-se reescrever a inequação (37) da seguinte forma:

$$\Delta\mathcal{M}_r \cong \left\langle \frac{\partial\mathcal{M}_r}{\partial B_l}, \Delta B_l \right\rangle \geq \mathcal{M}_{min} - \mathcal{M}_r \quad (39)$$

O cálculo de  $\frac{\partial\mathcal{M}_r}{\partial B_l}$  será detalhado no Capítulo 4.

A Equação (38) indica uma estimativa da contribuição de cada elemento  $l(u, v)$ , que pode ser adicionado a rede, para a estabilidade do SEP. Uma LT,  $l(u, v)$ , será uma solução viável para o problema de estabilidade se satisfizer a inequação (37), sendo calculada por meio da solução do problema de otimização como o apresentado na equação (20), por algum critério predefinido.

Considerando que a inequação em (39) é um modelo linear e o problema a ser resolvido neste trabalho trata-se de um problema não linear e, portanto, tem-se a linearização de um modelo complexo caracterizando-se uma limitação para os resultados obtidos. Assim, a fim de evitar que grandes erros ocorram quando  $\Delta\mathcal{M}$  é muito grande, adotou-se uma metodologia empírica de inferência para determinar o valor máximo permissível tal que o erro ocasionado seja aceitável, proposta por Minussi e Freitas (1998) e utilizada por Ferreira *et al.* (2006), ba-

seada no conceito de esforço de deslocamento da margem de segurança (EDMS), definida pela equação:

$$\gamma = \frac{(1 - \mathcal{M}^A)}{(1 - \mathcal{M}^B)} - 1 \quad (40)$$

Em que  $\gamma$  é o EDMS,  $\mathcal{M}^A$  é o valor inicial e  $\mathcal{M}^B$  é o valor alvo a ser alcançado pela margem de segurança. O EDMS pode ser interpretado como a distância entre a margem de segurança inicial e a margem alvo e aumenta à medida que  $\mathcal{M}^B$  se aproxima de 1. Foi mostrado em Minussi (1990) e em Minussi e Freitas (1998) que o valor de  $\gamma$  deve ser arbitrado entre 1 e 1,5, já que para valores menores do que 1 o número de iterações se torna elevado, aumentando assim o custo computacional. Para valores superiores a 1,5, introduz-se erros bastante significativos. Considerando esse intervalo, define-se  $\gamma_{esp}$ , que é o EDMS especificado de acordo com o critério citado anteriormente, ou seja,  $\gamma_{esp} = \gamma$ , com  $1 \leq \gamma \leq 1,5$  e, reescrevendo (40), substituindo  $\gamma$  por  $\gamma_{esp}$ , obtém-se:

$$\mathcal{M}^B = 1 - \frac{(1 - \mathcal{M}^A)}{(1 + \gamma_{esp})} \quad (41)$$

Dessa forma, pode-se gerar uma lista  $S$  de contingências para os elementos cujos valores da margem de segurança sejam menores que ou iguais a  $\mathcal{M}^B$  que deverão ser monitoradas. Será monitorado o elemento que apresentar menor valor para  $\mathcal{M}^B$ .

Reescrevendo a equação (41), substituindo  $\mathcal{M}^A$  e  $\mathcal{M}^B$  por  $\mathcal{M}(k)$  e  $\mathcal{M}(k + 1)$ , respectivamente, pode-se escrever uma expressão para calcular o valor alvo da margem de segurança, que é dada por:

$$\mathcal{M}(k + 1) = \eta\mathcal{M}(k) + \lambda \quad (42)$$

sendo:

$$\eta = 1/(1 + \gamma_{esp});$$

$$\lambda = 1 - \eta.$$

**Exemplo:** Supondo que  $\mathcal{M}(0) = -3$  e  $\gamma_{esp} = 1$ , obtém-se para a margem de segurança, a sequência de valores:  $\{-3; -1; 0; 0,5; 0,75; 0,875; 0,9375; 0,9688; \dots; 1\}$ . Como é possível observar, após sucessivas linearizações, pode-se alcançar um valor aceitável para a margem de segurança. Observa-se que, por esse procedimento, à medida que a margem de segurança se aproxima de 1, a melhoria em seu valor torna-se gradativamente menor. A mesma alteração que mudaria o valor da margem de segurança de -3 para -1 ( $\Delta\mathcal{M} = 2$ ) também mudaria de 0,9375 para 0,9688 ( $\Delta\mathcal{M} = 0,0313$ ). Nesse sentido, é conveniente optar por uma alternativa que exija um menor esforço para a solução do problema. Desta forma, por meio de experimentos, foi fixado para esta pesquisa o valor mínimo permissível da margem de segurança em 0,3.

### 3.4 CONCLUSÃO CAPITULAR

Neste capítulo foi apresentado um exemplo da aplicação do método das áreas iguais, com o objetivo de ilustrar a contribuição do reforço do sistema transmissão para a estabilidade do SEP. Também foram discutidos os critérios de seleção da(s) LT(s) a ser(em) incluída(s), do ponto de vista da margem de segurança do sistema, a partir da análise da lista de contingências geradas pelas simulações feitas.

A seleção da LT será realizada considerando-se a sensibilidade da margem de segurança à susceptância da linha. Não seria prático, no entanto, se a sensibilidade da margem de segurança, cujo cálculo será apresentado no Capítulo 4, tivesse de ser calculada para todas as contingências listadas. Obviamente, se fosse dessa forma, o custo computacional seria bastante elevado se o número de contingências fosse relativamente grande. Além disso, definir um critério que escolha para quais elementos da rede serão calculadas as sensibilidades das margens de segurança reduz significativamente o número de restrições a serem incluídas no problema de estabilidade transitória.

Finalmente, foi ressaltada a contribuição do EDMS, que pode ser interpretado como o tamanho do passo para o processo iterativo, para obtenção de resultados de qualidade e mais competitivos do ponto de vista do custo computacional, já que reduz o número de contingências a serem monitoradas.

## 4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE BASEADA NA MUDANÇA DE IMPEDÂNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Para garantir a estabilidade dinâmica dos SEP frente à grandes perturbações, faz-se necessário, considerando uma lista de contingências, avaliar como cada elemento do sistema se comporta após a ocorrência da falha. Caso a segurança do sistema fique comprometida, é fundamental que sejam feitas correções a fim de reestabelecer o seu funcionamento normal. Essas correções são denominadas na literatura como correção de segurança dinâmica, que são as alterações no funcionamento do SEP que visam à melhoria da estabilidade transitória e garantia da segurança do sistema. De acordo com Minussi (1990), o problema de melhoria da estabilidade dos SEP depende dos seguintes pontos, determinantes para o sucesso de qualquer tentativa:

- Listagem de contingências a serem monitoradas;
- Análise da estabilidade transitória por algum método que seja conveniente;
- Um critério que mede o quão estável o sistema se encontra;
- Uma ação, por parte do operador, com o objetivo de melhorar a segurança do sistema.

A correção proposta nesta pesquisa, como já citado, consiste de uma alteração no sistema de transmissão, que pode ser realizada via inclusão de linhas de transmissão. A designação da LT a ser incluída no sistema após a ocorrência da falha será estabelecida mediante a análise de sensibilidade dos elementos do sistema à susceptância da linha, aquela que tiver menor impacto sobre a estabilidade, ou seja, a que garantir maior segurança do sistema será adicionada. Neste capítulo são apresentados os cálculos da sensibilidade dos elementos do sistema elétrico em relação à susceptância da LT.

A sensibilidade dos elementos do sistema será avaliada para as configurações de rede pré-falta, sob falta e pós falta. Os sobrescritos  $(a)$ ,  $(f)$  e  $(p)$  referem-se, respectivamente, às configurações pré-falta, sob a falta e pós-falta.



## 4.2 O CÁLCULO DA SENSIBILIDADE DA MARGEM DE SEGURANÇA

O cálculo da sensibilidade da margem de segurança de energia transitória, frente à mudança de qualquer parâmetro pode ser realizado a partir da derivada parcial relativa a esse parâmetro (VITTAL, 1989; SONG; KEZUNOVIC, 2004). Assim, considerando a inclusão de um elemento de transmissão  $l(u, v)$ , a sensibilidade da margem de segurança do sistema pode ser calculada pela equação (43):

$$\frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial B_l} = \frac{\partial \left( \frac{Ecrit_r - Ee_r}{Ecrit_r} \right)}{\partial B_l} \quad (43)$$

A sensibilidade da margem de segurança será empregada aqui para avaliar o acréscimo necessário da margem de segurança ( $\Delta \mathcal{M}$ ), em função da alteração da impedância do sistema de transmissão e será calculada via análise de sensibilidade de primeira ordem, a partir da expansão por Série de Taylor.

Para simplificar a notação, escreve-se:  $ID_r = Ee_r/Ecrit_r$ . Então:

$$\frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial B_l} = \frac{\partial(1 - ID_r)}{\partial B_l} = -\frac{\partial ID_r}{\partial B_l} \quad (44)$$

Assim, a sensibilidade da margem de segurança em relação à susceptância de  $l(u, v)$ , avaliada no tempo crítico ( $tr$ ) e no tempo de eliminação de defeito ( $te$ ) representados, respectivamente, pelos sobrescritos ( $c$ ) e ( $e$ ), pode ser expressa por:

$$\frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial B_l} = \frac{ID_r \frac{\partial Ecrit_r}{\partial B_l} \Big|_{(\theta r^c, \omega r^c)} - \frac{\partial Ee_r}{\partial B_l} \Big|_{(\theta r^e, \omega r^e)}}{Ecrit_r} \quad (45)$$

em que:

$\frac{\partial(\cdot)}{\partial X} \Big|_{\chi}$  representa a derivada parcial de  $(\cdot)$  com relação a  $X$  e avaliada em  $\chi$ ;

$\partial E e_r / \partial B_l |_{(\theta r^e, \omega r^e)}$  é a sensibilidade da energia total do sistema, considerando o tempo de eliminação do defeito ( $te$ ), em relação a susceptância de  $l(u, v)$ , e é calculada pela equação:

$$\frac{\partial E e_r}{\partial B_l} |_{(\theta r^e, \omega r^e)} = \frac{\partial E c_r}{\partial B_l} |_{\omega r^e} + \frac{\partial E p_r}{\partial B_l} |_{\theta r^e} \quad (46)$$

As derivadas parciais de  $E c_r$  e de  $E p_r$  relativas a  $B_l$  são calculadas aplicando-se a regra da cadeia, pelas equações (47) e (48). Tem-se:

$$\frac{\partial E c_r}{\partial B_l} = \left\langle \frac{\partial E c_r}{\partial \boldsymbol{\omega r}}, \frac{\partial \boldsymbol{\omega r}}{\partial B_l} \right\rangle \quad (47)$$

Segue da definição da Energia Cinética (Equação (23)) que a sua sensibilidade em relação à velocidade angular é dada por:  $\partial E c_r / \partial \boldsymbol{\omega r} = \text{Diag}(M_s, s \in N) \boldsymbol{\omega r}$ , sendo  $\boldsymbol{\omega r} = [\omega r_1 \ \omega r_2 \ \dots \ \omega r_n]^T$ ;

A sensibilidade da energia potencial em relação à susceptância  $B_l$  é definida por:

$$\frac{\partial E p_r}{\partial B_l} = \left\langle \frac{\partial E p_r}{\partial \boldsymbol{\theta}}, \frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial B_l} \right\rangle = \langle \mathbf{P}e(\boldsymbol{\theta}) - \mathbf{P}m, \frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial B_l} \rangle + \nabla \boldsymbol{\theta} \quad (48)$$

sendo:

$$\mathbf{P}e(\boldsymbol{\theta}) = [Pe(\theta_1) \ Pe(\theta_2) \ \dots \ Pe(\theta_n)]^T;$$

$$\mathbf{P}m = [Pm_1 \ Pm_2 \ \dots \ Pm_n]^T;$$

$$\frac{\partial E p_r}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \left[ \frac{\partial E p_r}{\partial \theta_1} \ \frac{\partial E p_r}{\partial \theta_2} \ \dots \ \frac{\partial E p_r}{\partial \theta_n} \right]^T;$$

(49)

$$\frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial B_l} = \left[ \frac{\partial \theta_1}{\partial B_l} \ \frac{\partial \theta_2}{\partial B_l} \ \dots \ \frac{\partial \theta_n}{\partial B_l} \right]^T.$$

Isto porque se tratam de grandezas vetoriais. A parcela  $\nabla \boldsymbol{\theta}$  é definida como na Equação (50).

$$\nabla \boldsymbol{\theta} = -\frac{\partial}{\partial B_l} \left\{ \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} P e_i d\theta_i \right\} \quad (50)$$

Desprezando-se as condutâncias de transferência, a equação (50) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\nabla \boldsymbol{\theta} = - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j \{ \cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^p \} \frac{\partial B_{ij}^p}{\partial B_l} \quad (51)$$

Para calcular a sensibilidade da energia crítica, relativa à  $B_l$ , considera-se que a trajetória pós-falta do sistema se encontra em uma vizinhança de um ponto de equilíbrio instável e aplica-se a seguinte relação:

$$\frac{\partial E_{crit,r}}{\partial B_l} \Big|_{(\boldsymbol{\theta}^c, \boldsymbol{\omega}^c)} \cong \nabla \bar{\boldsymbol{\theta}} \quad (52)$$

Sendo  $\bar{\boldsymbol{\theta}}$  o vetor correspondente aos ângulos das MS sobre uma superfície de estabilidade, obtida por algum método de cálculo de estabilidade transitória, como o método PEBS (*Potential Energy Boundary Surface*), por exemplo. Reforça-se que o modelo apresentado não necessariamente precisa da aplicação do método PEBS, podendo-se utilizar qualquer outro método para o cálculo da estabilidade transitória.

Pode-se então reescrever a equação da sensibilidade da margem de segurança:

$$\frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial B_l} = \frac{ID \nabla \bar{\boldsymbol{\theta}} - \nabla \boldsymbol{\theta}^e + [\mathbf{P}\mathbf{m} - \mathbf{P}\mathbf{e}\boldsymbol{\theta}^e]^T \frac{\partial \boldsymbol{\theta}^e}{\partial B_l} - \boldsymbol{\omega}^{eT} \text{Diag}(M_s, s \in N) \frac{\partial \boldsymbol{\omega}^e}{\partial B_l}}{E_{crit,r}} \quad (53)$$

A sensibilidade da margem de segurança depende da sensibilidade de outros elementos da rede elétrica, como é possível observar nas equações anteriores. Por esse motivo, nas próximas seções serão discutidas as equações de sensibilidade (gradientes) da posição angular  $\boldsymbol{\theta}$ , da velocidade angular  $\boldsymbol{\omega}$  e das condutâncias e susceptâncias para cada configuração da rede.

### 4.3 SENSIBILIDADE DA POSIÇÃO ANGULAR E DA VELOCIDADE ANGULAR

Para cada contingência a ser considerada, há a necessidade de se avaliar as trajetórias do sistema para as configurações pré-falta e pós-falta. Assim, o estado  $(\boldsymbol{\theta}_r^e, \boldsymbol{\omega}_r^e)$  deve ser calculado, a partir do sistema de equações (12), para as configurações do sistema sob falta e no instante de eliminação do defeito ( $t_e$ ).

A solução do sistema de equações diferenciais demanda um esforço computacional consideravelmente elevado, nesse sentido pode-se empregar a expansão por Séries de Taylor como alternativa aos métodos de integração tradicionais para a solução desse sistema como foi feito por Ribbens-Pavella, Lemal e Pirard, (1977 citados por FONSECA; DECKER, 1985; MINUSSI, 1990; MINUSSI; DE FREITAS FILHO, 1998).

Considerando dois instantes  $t_h$  e  $t_{h+1}$ , a expansão por séries de Taylor transforma os ângulos e as velocidades em funções que dependem apenas do tempo, dentro do intervalo entre  $t_h$  e  $t_{h+1}$ , o que faz com que o sistema de equações diferenciais se torne um sistema de equações algébricas recursivas, resultando em um tempo menor de cálculo. Assim para calcular as sensibilidades do estado  $(\boldsymbol{\theta}_r^e, \boldsymbol{\omega}_r^e)$  relativa à susceptância, calcula-se a derivada parcial das expressões que definem os coeficientes da série:

$$\theta_i(t) = \sum_{q=0}^s \theta_i^{(q)}|_{t_{h-1}} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} + \mathcal{R}\theta_i \quad (54)$$

$$\omega_i(t) = \frac{d[\theta_i(t)]}{dt}, i \in N; t_{h-1} \leq t \leq t_h \quad (55)$$

sendo:

$t_{h-1}$  : tempos inicial do intervalo das expansões;

$t_h$  : tempo final do intervalo das expansões;

$\theta_i^q|_{t_{h-1}}$  : derivada temporal de  $q$ -ésima ordem de  $\theta_i$ , avaliada no instante  $t_{h-1}$ ;

$\mathcal{R}\theta_i$  : erro (resíduo) gerado pela aproximação da série. Neste trabalho, ele será desconsiderado.

Deve-se ressaltar que a precisão das aproximações realizadas via séries de Taylor é sensível à amplitude do intervalo de tempo em que é considerada a aproximação, à ordem das

aproximações e ao nível de carregamento do sistema. A verificação dos coeficientes deve ser feita com uma determinada frequência, que deve ser definida conforme forem sendo realizados os experimentos. Os coeficientes das séries são determinados por:

$$\theta_i^{(1)} = \omega_i \quad (56)$$

$$\theta_i^{(2)} = M_i^{-1} \left[ Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{MT} \sum_{j \in N} (Pm_j - Pe_j) \right] \quad (57)$$

Então, obtém-se a expressão para a derivada temporal de ordem  $m$  para o estado  $\theta_i$ , pela Equação (58):

$$\theta_i^m = -M_i^{-1} Pe_i^{(m-2)} + MT^{-1} \sum_{j \in N} Pe_j^{(m-2)} \quad (58)$$

sendo  $i \in N$  e  $m = 2, 3, \dots, s$ , e:

$$Pe_i^{(m)} = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \tau_{(m+1),q} \{B_{ij} F_{ij}^{(m)} + C_{ij} H_{ij}^{(m)}\} \quad (59)$$

As derivadas temporais de ordem  $m$  de  $F_{ij}$  e  $H_{ij}$  são dadas pelas equações (60) e (61), e são calculadas de acordo com (MINUSSI; FREITAS, 1998):

$$F_{ij}^{(m)} = \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \{ \theta_{i_q}^{(m-q+1)} H_{i_q}^{(q-1)} \} \quad (60)$$

$$H_{ij}^{(m)} = - \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \{ \theta_{i_q}^{(m-q+1)} F_{i_q}^{(q-1)} \} \quad (61)$$

$$\tau_{m,1} = \tau_{m,m} = 1 \quad (62)$$

$$\tau_{m,j} = \tau_{(m-1),j} + \tau_{(m-1),(j-1)} \quad (63)$$

Observa-se que os coeficientes  $\tau_{ij}$  (equações (62) e (63)) formam uma sequência de Fibonacci. Isto reforça a convicção que os cálculos executados estão corretos.

Uma vez conhecidos os coeficientes das séries, pode-se determinar a sensibilidade de  $\theta_i$  e  $\omega_i$ , com relação à susceptância, também via expansões sucessivas por Séries de Taylor. Os gradientes de  $\theta_i(t)$  e de  $\omega_i(t)$  são dados pelas equações (64) e (65):

$$\frac{\partial \theta_i(t)}{\partial B_l} = \sum_{q=0}^s \frac{\partial \theta_i^{(q)f}}{\partial B_l} \Big|_{(t_{h-1})} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} \quad (64)$$

$$\frac{\partial \omega_i(t)}{\partial B_l} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \theta_i(t)}{\partial B_l} \right) \quad (65)$$

com  $i \in N$  e  $t_{h-1} \leq t \leq t_h$  e sendo as derivadas parciais, com relação a  $B_l$  calculadas como a seguir, a partir das equações (56) - (63).

$$\frac{\partial \theta_i^{(1)}}{\partial B_l} = \frac{\partial \omega_i}{\partial B_l} \quad (66)$$

$$\frac{\partial \theta_i^{(m)}}{\partial B_l} = -M_i^{-1} \frac{\partial Pe_i^{(m-2)}}{\partial B_l} + MT^{-1} \sum_{j \in N} \frac{\partial Pe_j^{(m-2)}}{\partial B_l} \quad (67)$$

$$\frac{\partial Pe_i^{(m)}}{\partial B_l} = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \left\{ B_{ij} \frac{\partial F_{ij}^{(m)}}{\partial B_l} + C_{ij} \frac{\partial H_{ij}^{(m)}}{\partial B_l} + \frac{\partial B_{ij}}{\partial B_l} F_{ij}^{(m)} + \frac{\partial C_{ij}}{\partial B_l} H_{ij}^{(m)} \right\} \quad (68)$$

$$\frac{\partial F_{ij}^{(m)}}{\partial B_l} = \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \frac{\partial \theta_{i_q}^{(m-q+1)}}{\partial B_l} H_{i_q}^{(q-1)} + \theta_{i_q}^{(m-q+1)} \frac{\partial H_{i_q}^{(q-1)}}{\partial B_l} \right\} \quad (69)$$

$$\frac{\partial H_{ij}^{(m)}}{\partial B_l} = - \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \frac{\partial \theta_{i_q}^{(m-q+1)}}{\partial B_l} F_{i_q}^{(q-1)} + \theta_{i_q}^{(m-q+1)} \frac{\partial F_{i_q}^{(q-1)}}{\partial B_l} \right\} \quad (70)$$

sendo:

$\frac{\partial \{\circ\}^{(m)}}{\partial B_l}$  é derivada parcial da  $m$ -ésima derivada temporal de  $\{\circ\}$  em relação ao parâmetro

$B_l$ ;

As séries das equações (64) e (65) são truncadas para termos de ordens superiores a  $(s)$  e  $(s + 1)$ , respectivamente;

Para avaliar a estabilidade do sistema, é necessário que sejam avaliadas as sensibilidades dos seus elementos nas configurações sob a falta e pós-falta em relação aos elementos de transmissão a serem retirados/incluídos. Já que as alterações propostas são feitas no sistema de transmissão, as sensibilidades de seus elementos frente a esta mudança devem ser avaliadas, nesse sentido, as sensibilidades de  $B_{ij}$  e de  $C_{ij}$  utilizadas na Equação (68) serão discutidas mais detalhadamente nas seções 4.4 e 4.5.

#### 4.4 SENSIBILIDADE DA CONDUTÂNCIA E DA SUSCEPTÂNCIA DO SISTEMA PÓS-FALTA

A fim de avaliar a estabilidade do sistema após a ocorrência de uma determinada falta (para o contexto deste trabalho considera-se um curto-circuito) e propor ações com o intuito de garantir a segurança do sistema, de forma que as condições de estabilidade possam ser reestabelecidas, após a falha, é necessário avaliar a evolução do sistema antes do curto-circuito. As configurações da rede pré-falta servirão como parâmetro para a escolha da melhor ação a ser implementada, nesse caso, para a escolha da LT a ser incluída.

A matriz de admitância nodal, reduzida às barras internas para a configuração pré-falta é dada pela equação (71), de acordo com Anderson e Fouad (2002):

$$\mathbf{Y}_{RED}^a \triangleq \mathbf{Y}_{GG}^a - \mathbf{Y}_{GL}^a \mathbf{Z}^a \mathbf{Y}_{LG}^a \quad (71)$$

Cujos termos são determinados pelas submatrizes que formam a matriz  $\mathbf{Y}_{baum}$ , como descrito na seção 2.2.

Minussi e de Freitas Filho (1998) propõem uma forma alternativa de cálculo para as matrizes de admitâncias nodais  $\mathbf{Y}_{RED}$ , relativas às configurações sob falta e pós-falta, por meio da equação (72):

$$\mathbf{Y}_{RED} \triangleq [Y_{RED}^{ij}] = \begin{cases} (z_{ij}^a + \Psi_{ij} - jX'd_i) / X'd_i^2, & i = j \\ (z_{ij}^a + \Psi_{ij}) / (X'd_i X'd_i), & i \neq j \end{cases} \quad (72)$$

em que:

$z_{ij}$  o elemento da  $i$ -ésima linha e  $j$ -ésima coluna da matriz  $\mathbf{Z} = [\mathbf{Y}_{LL}]^{-1}$  ;

$X'd_i$  é a reatância transitória da  $i$ -ésima máquina síncrona;

O parâmetro  $\Psi_{ij}$  é definido de formas distintas para as configurações de falta e pós-falta.

- i. **Configuração de falta:** considerando uma falha do tipo curto-circuito em uma barra  $\beta$ , define-se:

$$\Psi_{ij}^f = -z_{i\beta^a} z_{\beta j^a} / (z_{\beta\beta^a}). \quad (73)$$

- ii. **Configuração pós-falta:** para o sistema pós-falta, considerando a retirada de uma linha  $\ell(r, s)$ , o parâmetro  $\Psi_{ij}^p$  é calculado pela equação (74):

$$\Psi_{ij}^p = Y_{\ell}^a (z_{ir^a} z_{jr^a} + z_{is^a} z_{js^a} - z_{is^a} z_{jr^a} - z_{ir^a} z_{js^a}) / (1 - Y_{\ell} \lambda_{\ell}^a) \quad (74)$$

Sendo:

$Y_{\ell}$  a admitância da linha de transmissão  $\ell$  a ser removida;

$$\lambda_{\ell}^a = z_{rr}^a + z_{ss}^a + 2z_{rs}^a. \quad (75)$$

Com base nas equações (72) - (75), é possível calcular as matrizes de admitância nodal para as configurações do sistema sob a falta e pós-falta. Assim, considerando-se a saída de uma linha de transmissão definida por  $\ell(r, s)$ , determina-se, a seguir, a matriz de admitância nodal reduzida às barras internas de geração para a configuração da rede pós-falta. Observa-se que as matrizes  $\mathbf{Y}_{GG}$ ,  $\mathbf{Y}_{GL}$  e  $\mathbf{Y}_{LG}$  não são influenciadas pelas alterações na rede de transmissão. Portanto, a matriz  $\mathbf{Y}_{RED}^p$  é definida por:

$$\mathbf{Y}_{RED}^p = \mathbf{Y}_{GG}^a - \mathbf{Y}_{GL}^a \mathbf{Z}^p \mathbf{Y}_{LG}^a \quad (76)$$

Os elementos da matriz reduzida para a configuração pós-falta são calculados via Equação (72) e são expressos pela Equação (77):

$$\mathbf{Y}_{red(ij)}^p = \mathbf{Y}_{GG(ij)}^a + z_{ij}^p / X'd_i X'd_j \quad (77)$$

Seja  $Y_{\ell}$ , a admitância série da linha de transmissão  $\ell(r, s)$  e seja o parâmetro  $b_{\ell}$ , definido por:



$$b_{\hat{k}} = \frac{Y_{\hat{k}}}{1 - Y_{\hat{k}} \lambda_{\hat{k}}^a} \quad (78)$$

Adaptando-se a fórmula de inversão da matriz de susceptância de barra, pode-se calcular a matriz  $\mathbf{Z}^p$ , para a configuração pós-falta, a partir dos parâmetros da rede pré-falta, pela equação (79):

$$\mathbf{Z}^p = \mathbf{Z}^a + b_{\hat{k}} \mathbf{Z}^a \mathbf{m}_{\hat{k}} \mathbf{m}_{\hat{k}}^T \mathbf{Z}^a \quad (79)$$

A matriz  $\mathbf{Z}$  para a configuração pós-falta, considerando a inclusão de um elemento de transmissão  $l(u, v)$ , denotada por  $\mathbf{Z}^{p*}$ , é calculada a partir da matriz definida em (79) pela equação (80):

$$\mathbf{Z}^{p*} = \mathbf{Z}^p + j b_l^p \mathbf{Z}^p \mathbf{m}_l \mathbf{m}_l^T \mathbf{Z}^p \{B_l\} \quad (80)$$

sendo:

$$b_l^p = \frac{1}{1 - j B_l \lambda_l^p};$$

$$\lambda_l^p = z_{uu}^p + z_{vv}^p - 2 z_{uv}^p;$$

$\mathbf{m}_l$  é a  $l$ -ésima coluna da matriz de incidência.

Para essa configuração, a matriz de admitância reduzida às barras internas, representada por  $\mathbf{Y}_{RED}^{p*}$ , é calculada usando-se a expressão:

$$\mathbf{Y}_{RED}^{p*} = \mathbf{Y}_{RED}^p - \mathbf{Y}_{GL}^a \{j b_l^p \mathbf{Z}^p \mathbf{m}_l \mathbf{m}_l^T \mathbf{Z}^p\} \mathbf{Y}_{LG}^a \{B_l\} \quad (81)$$

Escrevendo  $\mathbf{D} = \mathbf{Y}_{GL}^a \{j b_l^p \mathbf{Z}^p \mathbf{m}_l \mathbf{m}_l^T \mathbf{Z}^p\} \mathbf{Y}_{LG}^a$ , tem-se as sensibilidades de  $B^p$  e  $C^p$ , relativas a  $B_l$  estimadas pelas equações (84) e (85):

$$\frac{\partial \mathbf{B}^p}{\partial B_l} = \text{imag}(\mathbf{D}) \quad (82)$$

$$\frac{\partial C^p}{\partial B_l} = \text{real}(\mathbf{D}) \quad (83)$$

A partir do desenvolvimento de  $\mathbf{D}$ , escreve-se:

$$\frac{\partial B^p}{\partial B_l} \stackrel{\text{def}}{=} \left[ \frac{\partial B_{ij}^p}{\partial B_l} \right] = \frac{\text{imag}(\sigma_{ij}^p)}{x'd_i \cdot x'd_j} \quad (84)$$

$$\frac{\partial C^p}{\partial B_l} \stackrel{\text{def}}{=} \left[ \frac{\partial C_{ij}^p}{\partial B_l} \right] = \frac{\text{real}(\sigma_{ij}^p)}{x'd_i \cdot x'd_j} \quad (85)$$

Em que:

$$\sigma_{ij}^p = j \cdot b_l (z_{iu}^p - z_{jv}^p) (z_{ju}^p - z_{jv}^p).$$

As equações (84) e (85) são as expressões das derivadas parciais de  $B_{ij}$  e de  $C_{ij}$ .

Do desenvolvimento da equação (79) obtém-se os parâmetros  $z_{ij}^p$ , que são expressos por:

$$z_{ij}^p = z_{ij}^a + b_{\ell} (z_{ir}^a - z_{is}^a) (z_{jr}^a - z_{js}^a)$$

#### 4.5 SENSIBILIDADE DA CONDUTÂNCIA E DA SUSCEPTÂNCIA DO SISTEMA SOB FALTA

Supondo a inclusão de uma linha de transmissão  $l(u, v)$  e a aplicação de um curto-circuito em uma barra de índice  $\beta$ , a sensibilidade de  $B_{ij}$  e de  $C_{ij}$ , para a configuração da rede sob falta pode ser calculada por meio das equações desenvolvidas na seção 4.4, como a seguir:

$$\frac{\partial \mathbf{B}^f}{\partial B_l} \stackrel{\text{def}}{=} \left[ \frac{\partial B_{ij}^f}{\partial B_l} \right] = \frac{\text{imag}(\sigma_{ij}^f)}{x'd_i \cdot x'd_j} \quad (86)$$

$$\frac{\partial \mathbf{C}^f}{\partial B_l} \stackrel{\text{def}}{=} \left[ \frac{\partial C_{ij}^f}{\partial B_l} \right] = \frac{\text{real}(\sigma_{ij}^f)}{x'd_i \cdot x'd_j} \quad (87)$$

em que o sobrescrito ( $f$ ) representa a condição sob falta, nesse caso, curto-circuito, e:

$$\sigma_{ij}^f = b_l^f \cdot (z_{iu}^f - z_{iv}^f) \cdot (z_{ju}^f - z_{jv}^f);$$

$$b_l^f = \frac{1}{1 - j B_l \cdot \lambda_l^f};$$

$$\lambda_l^f = z_{uu}^f + z_{vv}^f - 2z_{uv}^f.$$

A construção da matriz  $\mathbf{Z}^f$ , em função de  $\mathbf{Z}^a$ , é feita de maneira análoga às anteriores, via desenvolvimento da Equação (71). Logo, tem-se:

$$\mathbf{Z}^f = \mathbf{Z}^a + b_\beta^a \mathbf{Z}^a \mathbf{m}_\beta \mathbf{m}_\beta^T \mathbf{Z}^a \quad (88)$$

sendo:

$$b_\beta^a = -\frac{1}{z_{\beta\beta}^a};$$

$\mathbf{m}_\beta$  é a  $\beta$ -ésima coluna da matriz de incidência.

A partir do desenvolvimento da Equação (88), obtém-se a expressão para os elementos de  $\mathbf{Z}^f$ , em função de  $\mathbf{Z}^a$ :

$$z_{ij}^f = z_{ij}^a - \frac{z_{i\beta}^a \cdot z_{\beta j}^a}{z_{\beta\beta}^a} \quad (89)$$

Calculadas as sensibilidades desenvolvidas anteriormente pode-se calcular a sensibilidade da margem de segurança do sistema, pela Equação (53). Após o cálculo da sensibilidade da margem de segurança será gerada uma matriz de sensibilidade que tem em suas colunas as sensibilidades relacionadas à lista de contingência gerada para o sistema elétrico, que poderão ser ordenadas por ordem de severidade.

## 4.6 CONCLUSÃO CAPITULAR

Foram apresentados, neste capítulo, os parâmetros que serão usados para a seleção da linha de transmissão a ser adicionada para realizar o controle de segurança dinâmica do sistema. A avaliação da sensibilidade dos elementos da rede em relação à retirada/inclusão de LT

mede o grau de estabilidade que pode ser garantida após a realização das alterações. Nesse sentido, é de fundamental importância conhecer todos os estados do sistema elétrico, antes da ocorrência da falha, durante e depois da ação de controle e a sua relação com a margem de segurança, para então decidir qual a melhor ação de controle a ser implementada.

Para o cálculo da sensibilidade da margem de segurança, foram utilizadas aproximações por séries de Taylor para obter uma relação entre os ângulos, as velocidades angulares e a trajetória do sistema sob o defeito. Trata-se de procedimento que consiste de sucessivas linearizações, cuja precisão pode ser ajustada conforme se realiza as simulações do sistema. As aplicações do modelo proposto serão apresentadas no próximo capítulo.

## 5 ALTERAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO, BASEADA NA SENSIBILIDADE DA MARGEM DE SEGURANÇA

### 5.1 INTRODUÇÃO

A melhoria da estabilidade do SEP é abordada, neste trabalho, do ponto de vista da análise de sensibilidade da sua margem de segurança. A expressão apresentada na equação (38), gerada através da margem de segurança, dos resultados de análise da estabilidade transitória e da análise de sensibilidade fornecem dados acerca do funcionamento do SEP que permitem avaliar qual a melhor ação a ser considerada para a melhoria da estabilidade e, consequentemente, da segurança deste.

Neste capítulo, serão detalhados os critérios para a realização do CSD, nesse caso a alterações no sistema de transmissão, baseados em simulações computacionais do comportamento do sistema elétrico, visando a melhoria da segurança deste. Para isso, serão apresentadas as equações das sensibilidades dos estados de rede pré-falta para que então, baseando-se nesses dados, sejam feitos os cálculos de estabilidade transitória e análise de sensibilidade para as outras configurações da rede.

Também são apresentados critérios para a aplicação do conceito de EDMS, com o objetivo de otimizar o processo de avaliação da sensibilidade da margem de segurança, proporcionando um custo computacional menor, quando da avaliação de sistemas muito grandes, reduzindo-se o número de contingências a serem monitoradas.

### 5.2 INICIALIZAÇÃO DO CÁLCULO DA SENSIBILIDADE DE POSIÇÃO E DA VELOCIDADE ANGULARES

Para avaliar o comportamento do sistema frente às perturbações e após qualquer ação de controle é preciso conhecer as condições de partida deste, ou seja, é necessário conhecer o estado do sistema antes da ocorrência da falta e após a ação de controle de segurança. Para os objetivos deste trabalho, é necessário conhecer as condições do estado pré-falta e sua sensibilidade em relação às susceptâncias das linhas de transmissão a serem retiradas/incluídas. O cálculo das sensibilidades  $\partial\theta/\partial B_l$  e  $\partial\omega/\partial B_l$ , é feito via aproximação por séries de Taylor.

Como citado anteriormente, para avaliar a sensibilidade do estado do sistema elétrico, é preciso determinar a relação entre o estado  $(\boldsymbol{\theta}_r^e, \boldsymbol{\omega}_r^e)$  e as condições de equilíbrio pré-falta, calculadas pelas expressões:

$$\frac{\partial \theta^a}{\partial B_l} = \sum_{q=0}^s \frac{\partial \theta^{(q)f}}{\partial B_l} \Big|_{(t_{(h-1)})} \frac{(t - t_{(h-1)})^q}{q!} \quad (90)$$

$$\frac{\partial \omega^a}{\partial B_l} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial \theta^a}{\partial B_l} \right] \quad (91)$$

com  $t_{(h-1)} \leq t \leq t_h$ . Para tanto, deve-se considerar a variação dos ângulos nas barras, que é dada por:

$$\Delta \boldsymbol{\alpha}^a = \mathbf{X}^a \cdot \Delta \mathbf{P} \quad (92)$$

onde  $\boldsymbol{\alpha}$  é o vetor correspondente aos ângulos de barras,  $\mathbf{B}^a$  é a matriz de susceptância de barra pré-falta, excluídas as barras de geração;

$$\mathbf{X}^a \stackrel{\text{def}}{=} \{\mathbf{B}^a\}^{-1};$$

$\Delta \mathbf{P}$  é a relação entre a variação da potência mecânica de entrada e a variação dos ângulos pré-falta e é definida por:

$$\Delta \mathbf{P} = -E_u E_v B_l (\alpha_{uv}^a + \Delta \alpha_{uv}^a) \mathbf{m}_l; \quad (93)$$

$\mathbf{m}_l$  é a  $l$ -ésima coluna da matriz de incidência, cujos elementos são determinados pela equação (94):

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a corrente no ramo } j \text{ sai do vértice } i; \\ -1, & \text{se a corrente no ramo } j \text{ entra do vértice } i; \\ 0, & \text{se a corrente no ramo } j \text{ não incide no vértice } i. \end{cases} \quad (94)$$

Assim sendo, se  $x_{ij}^a$  é o  $ij$ -ésimo elemento da matriz  $\mathbf{X}^a$  e definindo-se:

$$\mathbf{h} = -b_l^a [(x_{1u}^a - x_{1v}^a) \cdot (x_{2u}^a - x_{2v}^a) \dots (x_{nu}^a - x_{nv}^a)]^T \quad (95)$$

Sendo:

$$b_l^a = \alpha_{uv}^a / (1 + B_l^a \lambda_l^a); \quad (96)$$

$$\lambda_l^a = x_{uu}^a + x_{vv}^a - 2 x_{uv}^a; \quad (97)$$

Pode-se expressar (92) como (MINUSSI; DE FREITAS FILHO, 1998):

$$\Delta \alpha^a = \mathbf{h}^a \Delta B_l \quad (98)$$

Destaca-se que, do ponto de vista da dinâmica estrutural da rede elétrica, os valores de  $\Delta \alpha^a$  e de  $\Delta \delta^a$  são idênticos. Portanto, pode-se escrever:

$$\Delta \delta^a = \mathbf{h}^a \Delta B_l. \quad (99)$$

Considerando  $\mathbf{I}$  a matriz identidade e  $\mathbf{U}$  uma matriz unitária, ambas quadradas e de ordem  $i \leq N$ , define-se:

$$\mathbf{T} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{I} - \mathbf{U} \text{Diag}(M_i / MT, i \in N).$$

Escreve-se  $\Delta \theta^a$  em função de  $\Delta \delta^a$  pela Equação (100), para o cálculo da sensibilidade  $\partial \theta^a / \partial B_l$ .

$$\Delta \theta^a = \mathbf{T} \cdot \Delta \delta^a \quad (100)$$

Substituindo (99) em (100), obtém-se:

$$\Delta \theta^a = \mathbf{T} \cdot \mathbf{h} \cdot \Delta B_l \quad (101)$$

Consequentemente, a expressão da sensibilidade de  $\theta^a$  com relação a  $B_l$  é dada por:

$$\frac{\partial \theta^a}{\partial B_l} \cong \mathbf{T} \cdot \mathbf{h} \quad (102)$$

e já que  $\dot{\theta} = \omega$ , a sensibilidade de  $\omega^a$  é definida por:

$$\frac{\partial \omega^a}{\partial B_l} = 0 \quad (103)$$

Observa-se que, qualquer que seja a alteração dos parâmetros no sistema de transmissão, a velocidade da MS será sempre constante, já que sua variação é nula.

### 5.3 CORREÇÃO DA SEGURANÇA DINÂMICA

Considerando-se uma lista de  $S$  contingências, ordenadas ou não, por ordem de severidade, gerada por algum método de análise de estabilidade transitória, podendo ser o PEBS, por exemplo, a correção de segurança dinâmica é feita considerando a contingência de maior gravidade, ou seja, aquela para a qual o valor da margem de segurança “extrapola mais” o valor mínimo permissível. A correção da segurança, que será feita por meio inclusão de uma nova linha de transmissão, visa melhorar a estabilidade dinâmica do sistema, observando a melhoria da margem de segurança. Portanto, o valor mínimo da margem de segurança, para este modelo, serve de referência para a escolha da linha sob a contingência, mas não é usada como um valor determinante para a escolha da linha a ser incluída. A linha a ser incluída será a que oferecer mais melhoria no valor da margem de segurança.

A alteração no sistema de transmissão provoca mudança na impedância do sistema. Por esse motivo, como já foi observado nos capítulos anteriores, toda a análise de sensibilidade é feita do ponto de vista da susceptância da linha a ser retirada/incluída. Assim, da Equação (38) obtém-se a contribuição de cada linha de transmissão para a estabilidade do SEP, quando são consideradas as linhas que podem ser adicionadas ao sistema. Aquelas soluções que satisfazem a restrição (39) obtidas, por exemplo, via resolução de algum problema de otimização, ou minimização de algum critério preestabelecido, são consideradas soluções viáveis.

Como observado na seção 3.3, uma das limitações do modelo apresentado neste trabalho é o fato de que, ao usar um modelo linear para representar a sensibilidade da margem de segurança (Equação (39)) ocasiona-se a incidência de erros no valor de  $\Delta B_l$  durante as sucessivas linearizações que são empregadas no cálculo. Uma forma de estimar um erro máximo permissível pode ser aplicando-se uma heurística, como a apresentada nessa mesma seção, baseada no esforço de EDMS, como foi apresentado por Ferreira *et al.* (2006).

Minussi (1990), propõe dois critérios para a adoção do valor do EDMS com o objetivo de reduzir o número de iterações e, assim, reduzir o erro produzido pelas sucessivas



linearizações. Trata-se de dois critérios que fixam o valor do esforço de deslocamento, sendo que um deles adota um valor único para o EDMS e o outro adota um intervalo que compreende os valores adotados, em ambos os casos o valor mínimo da margem de segurança é fixado em 0,3. Para as aplicações realizadas nesta pesquisa foram adotados  $\gamma_{esp} = 1$  e  $\mathcal{M}_{min} = 0,3$ . O critério de escolha dos valores para  $\gamma_{esp}$  e para  $\mathcal{M}_{min}$  deve ser adotado de acordo com o sistema a ser analisado

No exemplo apresentado na seção 3.3, considerando-se  $\mathcal{M}(0) = -3$  e  $\gamma_{esp} = 1$ , e portanto, seguindo o primeiro critério, obtém-se como resultado a cada passo do processo iterativo valores para a margem de segurança dentro de uma mesma faixa de valores. Na Figura 6 mostra-se a variação da margem de segurança durante o cálculo iterativo a partir de valores de margem iniciais de -3, -2 e -1.

**Figura 6** - Variação da margem de segurança, aplicando-se o conceito de EDMS.

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Observa-se na Figura 7 que o maior ganho no valor da margem de segurança, segundo esse critério, se dá nas seis primeiras iterações, tonando-se quase constante a partir de então. Ressalta-se, portanto, que esses são dois parâmetros de absoluta importância para a realização do controle de segurança aqui proposto, devendo-se observar a amplitude do intervalo do EDMS e que quanto maior o valor da margem alvo, mais elevado será o número de iterações a serem realizadas para a obtenção da mesma.

Com o objetivo de limitar a quantidade de contingências a serem monitoradas, a fim de reduzir o número de linearizações e com isso o custo computacional, define-se um critério baseado no EDMS para estabelecer a margem de segurança alvo,  $\mathcal{M}^B$ , para isso arbitra-se um valor máximo pra o EDMS,  $\gamma_{max}$ , e define-se como limitante superior da margem de segurança dada pela Equação (104):

$$\mathcal{M}_M = 1 - \frac{1 - \mathcal{M}^B}{1 + \gamma_{max}} \quad (104)$$

sendo  $\mathcal{M}_M$  o limitante superior para o valor da margem de segurança a ser avaliado. Serão monitoradas apenas as contingências com valor de margem de segurança inferior a  $\mathcal{M}_M$ .

## 5.4 CONCLUSÃO CAPITULAR

O processo de linearização para a obtenção das sensibilidades dos estados da rede elétrica é um processo eficiente para avaliar a sensibilidade da margem de segurança. Porém, a sua eficiência é limitada ao número de linearizações sucessivas que precisam ser realizadas para a obtenção desses valores, já que pode ocasionar o acréscimo de erros no resultado obtido. Foram discutidas, neste capítulo, alternativas para minimizar os erros que possam ser causados pelo processo iterativo aplicado para a obtenção das sensibilidades, sem que ocorra a perda de precisão do modelo.

Utilizando o conceito de EDMS, foi proposto um critério que limita a quantidade de contingências a serem monitoradas para a aplicação do controle de segurança, de forma que, ainda que o número de máquinas seja elevado, tenha-se o custo computacional minimizado já que são monitoradas apenas as contingências mais críticas, em razão de ter sido fixado um limitante máximo para o valor da margem de segurança para as contingências a serem monitoradas.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

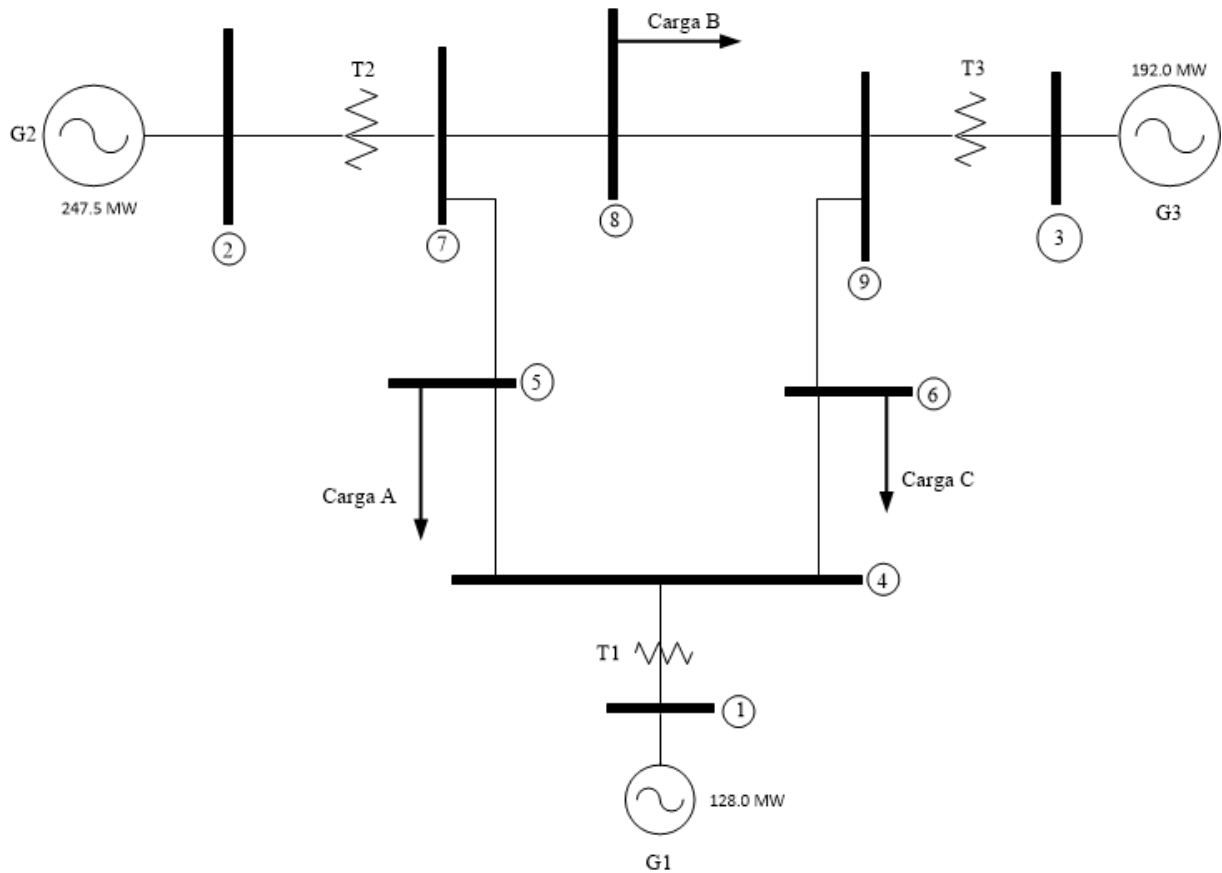
Neste capítulo, serão apresentados os resultados de testes, via SIMUL, para um sistema fictício de 9 barras, apresentado por Anderson e Fouad (2002) composto por 3 MS, e para um sistema baseado na configuração da região Sul do Brasil, utilizado por Minussi (1990), composto por 45 barras, sendo 10 MS, utilizando-se os dados de estabilidade gerados pelo programa SIMUL para a estabilidade transitória, o modelo de análise de sensibilidade apresentado nesta pesquisa e as alterações no sistema de transmissão necessárias para a melhoria da segurança dinâmica desses sistemas.

Os cálculos para a análise de sensibilidade foram obtidos por meio de um outro programa, também em codificação Fortran, chamado SENSIT, desenvolvido no laboratório SINTEL, no Departamento de Energia Elétrica da UNESP de Ilha Solteira.

### 6.2 O SISTEMA DE 3 MÁQUINAS

Considerando um sistema composto por 9 barras, sendo 3 MS, e 9 linhas de transmissão, apresentado por Anderson e Fouad (2002, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 7. Foram realizadas simulações considerando-se faltas do tipo curto-circuito, com tempo de eliminação de defeito igual a 0,15s, ou 9 ciclos, seguido pela perda de uma linha de transmissão. A barra adotada como referência do sistema será a barra número 3, os valores apresentados em pu, referem-se a uma base de 100 MVA e todas as unidades de tempo são em segundos (s).

**Figura 7** - Diagrama unifilar do sistema de 9 barras proposto por Anderson e Fouad, (2002).



**Fonte:** Adaptado de Anderson e Fouad (2002).

Os dados de Potência Mecânica ( $P_m$ ), reatância ( $x_d$ ), reatância transitória ( $x'_d$ ) e constante de inércia ( $H(s)$ ) são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Dados das Máquinas do Sistema de 9 Barras.

Máquinas Síncronas	Potência Mecânica (pu)	Potência Nominal (MVA)	Reatância		Constante de Inércia $H$ (s)
			$x_d$ (pu)	$x'_d$ (pu)	
1	0,72	247.5	0,1460	0,0608	9,552
2	1,63	192.0	0,8958	0,1198	3,333
3	Referência	128.0	1,3125	0,1813	2,352

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Na Tabela 2 são especificadas as potências elétricas ( $Pe$ ) das barras de carga do sistema, sendo a parte ativa dada em MW e a parte reativa em MVAR.

**Tabela 2** - Dados das Barras de Carga (pu).

Dados de Carga (pu)				
Potência Elétrica (pu)	Nº da Barra	5	6	8
	Ativa	1,25	0,90	1,00
	Reativa	0,50	0,30	0,35

**Fonte:** Elaborado pela autora.

**Tabela 3** - Dados das Linhas de Transmissão.

Elementos do Sistema de Transmissão				
Elemento	Barra inicial	Barra Final	Impedância Série (pu)	Susceptância <i>Shunt</i> (pu)
1	1	4	0,0000 + j 0,0570	0
2	4	5	0,0100 + j 0,0850	j 0,0880
3	4	6	0,0170 + j 0,0920	j 0,0790
4	5	7	0,0320 + j 0,1610	j 0,1530
5	6	9	0,0390 + j 0,1700	j 0,1790
6	2	7	0,0000 + j 0,0625	0
7	7	8	0,0085 + j 0,0720	j 0,7450
8	8	9	0,0119 + j 0,1008	j 0,1045
9	3	9	0,0000 + j 0,0586	0

**Fonte:** Elaborado pela autora.

A Tabela 3 apresenta os dados referentes ao sistema de transmissão. Para os cálculos de sensibilidade, as impedâncias foram transformadas em admitâncias. Os dados apresentados nas tabelas 1, 2 e 3 serviram como dados de entrada para o programa SIMUL, que forneceu os dados do fluxo de potência e de estabilidade transitória para uma lista de 12 contingências,

ordenadas por ordem de severidade, apresentados na Tabela 4. As barras sob a falta são representadas por  $\rho(\alpha, \beta)$ , sendo  $\alpha$  a barra Inicial e  $\beta$  a barra final da LT ( $\alpha - \beta$ ).

Neste experimento, empregou-se o aplicativo SIMUL para o cálculo da estabilidade transitória.

**Tabela 4** - Dados de estabilidade transitória.

Nº da Falta	Barra sob curto- circuito ( $\rho$ )	Elemento retirado ( $\alpha - \beta$ )		Estado Crítico		Energia (Eliminação de Falta)	Margem de Segurança
		$\alpha$	$\beta$	$t_{crit}(s)$	Energia Crítica		
8	7	7	8	0,11	0,8729	1,7636	-1,0204
7	7	5	7	0,13	1,3452	1,8058	-0,3423
9	8	7	8	0,20	1,4816	0,8346	0,4367
10	8	8	9	0,22	1,9848	0,8534	0,5700
12	9	6	9	0,23	1,6113	0,6927	0,5701
3	5	5	7	0,33	1,4413	0,5309	0,6317
11	9	8	9	0,26	3,3437	0,8847	0,7354
5	6	6	9	0,55	1,7389	0,2953	0,8302
2	4	4	6	0,29	2,5117	0,3793	0,8490
4	5	4	5	0,42	2,4750	0,2803	0,8867
1	4	4	5	0,34	2,6031	0,2730	0,8951
6	6	4	5	0,55	2,6892	0,1634	0,9392

**Fonte:** Elaborado pela autora.

O aplicativo SIMUL (SIMUL, 1995) é uma versão desenvolvida baseada no método iterativo. Este método iterativo é baseado no conceito PEBS (*Potential Energy Boundary Surface*) (ATHAY; PODMORE; VIRMANI, 1979). Trata-se de um procedimento baseado no refinamento do cálculo da energia crítica “observando” a energia total e o parâmetro  $D$  (equação (29)). Ou seja, toda a trajetória (estado) do sistema (ângulos e velocidades angulares) interior à região de estabilidade transitória terá sempre um valor negativo do parâmetro  $D$ . Enquanto que, quando a trajetória estiver percorrendo externamente à região da estabilidade transitória, em algum instante (tempo) ocorrerá um valor positivo para  $D$ . Ressalta-se que este processo de cálculo da energia crítica ( $E_{crit}$ ) é bastante preciso, quando se emprega o modelo clássico. Igualmente, ressalta-se que o modelo de sensibilidade apresentado nesta tese não é dependente do referido método (PEBS iterativo). O programa SIMUL está sendo usado, tendo

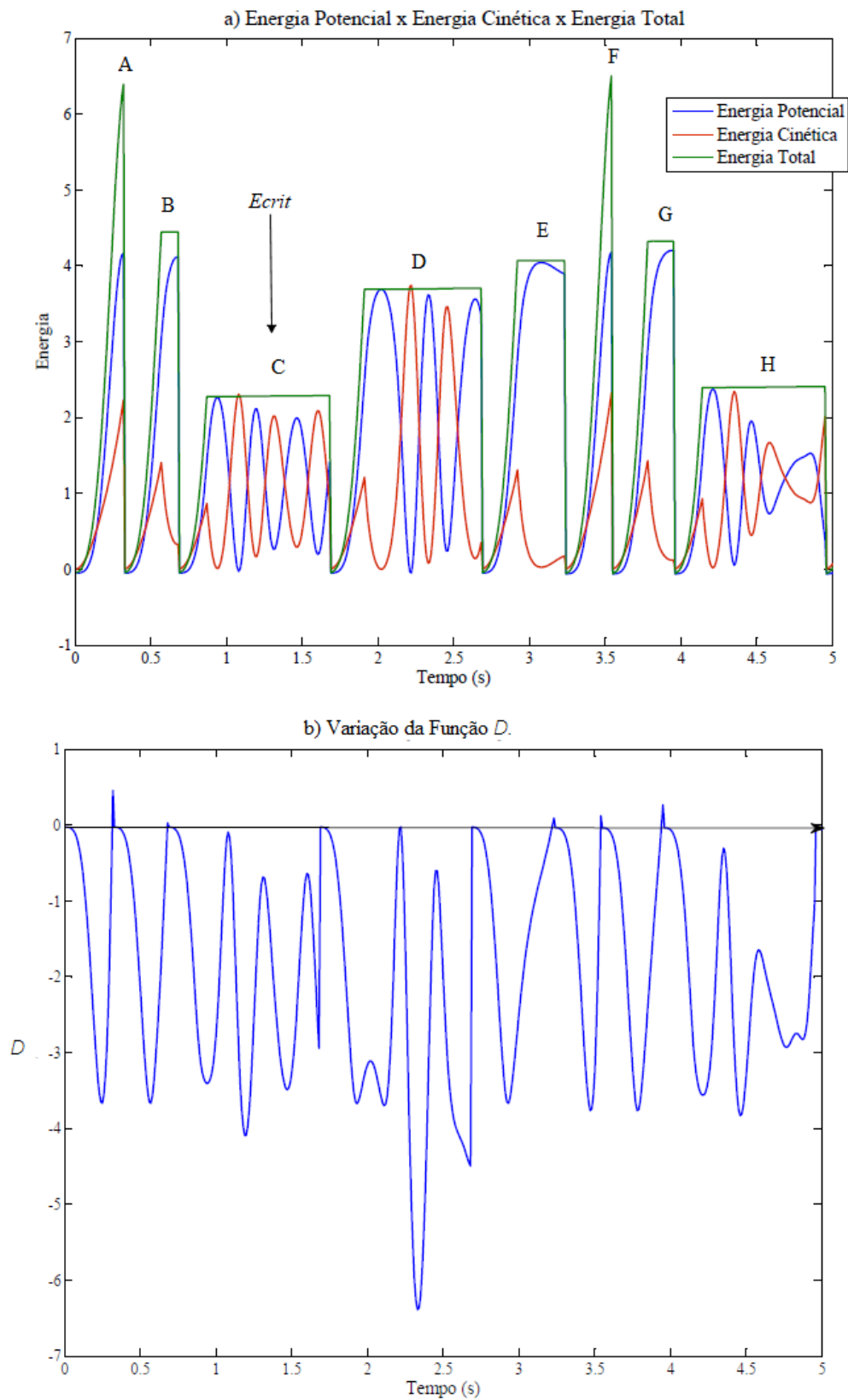
em vista à disponibilidade no Laboratório SINTEL do Departamento de Engenharia Elétrica – UNESP e, também em razão de ser uma arquitetura aberta, permitiu o cálculo e o acesso de vários parâmetros e variáveis que são necessários para a elaboração do modelo de sensibilidade aqui proposto. Para melhor entender o aplicativo SIMUL, na Figura 8 são ilustrados o método de busca de *Ecrit*.

O processo de busca da energia crítica (*Ecrit*) consiste de um procedimento heurístico tomando-se, inicialmente, duas estimativas da energia crítica: (1) para a escolha da estimativa de  $E_{mín}$ , inicialmente, arbitra-se igual a 0. Na sequência, realiza-se a Integração Numérica (IN) considerando a configuração da rede sob a falta (curto-circuito). Neste período, a energia total  $E$  cresce com um comportamento basicamente similar a uma parábola com parada quando  $D$  muda de sinal negativo para positivo. (2) Para estimar o valor de  $E_{máx}$ , fixa-se a energia máxima ( $E_{máx}$ ) igual a energia potencial. Retorna-se ao início da trajetória de falta até atingir o valor  $E_{máx}$ . A partir deste ponto, passa-se a realizar a IN das equações (12) considerando-se a configuração pós-defeito até o tempo máximo de simulação (em torno de 2s). No processo iterativo, busca-se minimizar a “distância” entre  $E_{máx}$  e  $E_{mín}$ . Ao ser encontrado o valor mínimo, a energia crítica (*Ecrit*) é arbitrada (melhor estimativa) como sendo igual à  $E_{mín}$  (correspondente a uma trajetória estável).

A partir da Figura 8, observa-se que, inicialmente, o comportamento da trajetória do sistema referente ao período sob a falta (curto-circuito), é mantido até o instante em que se observa a mudança do sinal de  $D$ , conforme pode-se observar na Figura 8(b), que ocorre aproximadamente entre 0,3 e 0,35s, exatamente sobre o ponto A da Figura 8(a). Neste caso,  $E_{máx}$  é atribuída igual à energia potencial acrescida de um pequeno percentual para “garantir” que se trata de uma trajetória instável (primeira estimativa). Assim, retorna-se ao início da falta e se processa a integração do sistema de equações (12) até atingir  $E = E_{máx}$ . A partir deste ponto, passa-se a usar a configuração pós-falta. O tempo de simulação será mantido até atingir o tempo máximo (trajetória estável), ou ter sido identificada a troca de sinal de  $D$  (trajetória instável).

Na Figura 8(a), os patamares B, E, F e G correspondem a trajetórias instáveis (houve a mudança de sinal do parâmetro  $D$ ). Nos patamares C, D e H não houve a inversão de sinal de  $D$ . Por conseguinte, tratam-se de trajetórias estáveis do ponto de vista da estabilidade transitória. Como se pode observar, na Figura 8, há seis patamares constantes ( B até E, G e H) estabelecidos por um número máximo de tentativas, o qual é fixado pelo usuário.

**Figura 8** - Curvas da energia total, da energia potencial e de  $D$ , durante a execução do método PEBS iterativo.



**Fonte:** Elaborado pela autora.



Após a primeira estimativa de  $Emáx$ , calcula-se a média aritmética ( $Emed$ ) entre  $Emáx$  e  $Emín$ . Observa-se que pode ser usada outra heurística qualquer, por exemplo, a divisão áurea. Nesta situação, para uma energia total igual à  $Emédia$  produzir uma trajetória estável ou uma trajetória instável,  $Emín = Emédia$ , ou  $Emáx = Emédia$ , respectivamente. Assim por diante é processado até que a convergência seja observada. Na Figura 9, nota-se que a convergência ocorreu em 4 tentativas (no patamar D). Porém, a execução deste processo foi interrompida por exaustão, ou seja, atingiu o número máximo de tentativas.

Observa-se que durante o processo de integração das equações diferenciais do sistema (12) para a configuração pós-falta, a energia total ( $E$ ) se mantém constante. Como esta energia advém de um processo de cálculo cumulativo aproximado, este valor constante demonstra que todos os cálculos realizados, na codificação do aplicativo SIMUL, estão efetivamente corretos.

O cálculo do coeficiente de sensibilidade (da margem de segurança em relação à susceptância da LT a ser adicionada à operação do sistema) é realizado por outro programa, designado SENSIT, em código Fortran. A execução do SIMUL produz os resultados da análise da estabilidade transitória, além de várias informações que são necessárias para alimentar o SENSIT. Uma vez obtido o coeficiente de sensibilidade, pode-se estimar o acréscimo da margem de segurança, quando, por hipótese, entrar em operação nova LT. Este resultado é confrontado com o resultado auferido, via processamento do SIMUL, o qual será ilustrado em tabela mais adiante. Na forma embrionária, o processo de cálculo segue este roteiro. Contudo, na sequência dos trabalhos, buscar-se-á tornar este cálculo de modo automático.

Considerando a margem de segurança mínima  $\mathcal{M}_{min} = 0,3$  como a margem alvo,  $\mathcal{M}^B$ , e a margem de segurança obtida para a contingência número 8, que é mais crítica, apresentando um valor inicial de margem de segurança  $\mathcal{M}^A = -1,0204$ , tem-se o EDMS,  $\gamma = 1,8863$ . Isso significa que para alcançar a margem de segurança mínima é necessária apenas uma linearização, o que implica maior qualidade para o resultado obtido. Além disso, usando o conceito de EDMS, pode-se também reduzir o número de contingências a serem monitoradas para o conjunto de contingências 8, 7, 9, 10, 12 e 3, considerando  $\gamma_{max} = 1,8863$  e a margem de segurança alvo,  $\mathcal{M}^B = \mathcal{M}_{min} = 0,3$ .

Para os experimentos realizados para esse sistema, o EDMS foi fixado em  $\gamma = 1$ , portanto, tem-se a margem alvo  $\mathcal{M}^B = -0,0102 \cong 0$ . Os resultados obtidos, considerando a barra 7 sob defeito e a saída da LT que liga a barra 7 à barra 8, foram simuladas as inclusões

de linhas de transmissão e calculadas as sensibilidades da margem de segurança relativas a essas linhas. Foram realizados 15 testes, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** - Resultados das Simulações Ordenadas por Margem de Segurança, Baseadas na Mudança de Impedância via Inclusão de LT.

Elemento Adicionado		Cálculo da Sensibilidade da Margem de Segurança				Valor exato de $\mathcal{M}_8$
$l(u, v)$		$B_l(pu)$	$\partial\mathcal{M}_8/\partial B_l$	$\Delta\mathcal{M}_8$	$\mathcal{M}_8$	
$u$	$v$					
4	7	10,4712	0,1271	1,3308	0,3102	0,3902
6	7	10,4712	0,1186	1,2418	0,2214	0,2834
7	9	10,4712	0,1194	1,2499	0,2295	0,2744
7	8	13,6980	0,0901	1,2348	0,2144	0,2739
5	7	5,9710	0,1534	0,9159	-0,1045	0
5	9	10,4712	0,0830	0,8691	-0,1513	-0,1820
6	8	10,4712	0,0672	0,7037	-0,3167	-0,3890
5	8	10,4712	0,0869	0,9100	-0,1104	-0,1802
4	8	10,4712	0,0668	0,6990	-0,3214	-0,3849
4	9	10,4712	0,0653	0,6839	-0,3365	-0,3916
6	9	5,5880	0,1219	0,6814	-0,3390	-0,3919
4	6	10,4712	0,0642	0,6726	-0,3478	-0,3959
8	9	10,5170	0,0635	0,6679	-0,3525	-0,3972
5	6	10,4712	0,0383	0,4006	-0,6198	-0,7094
4	5	11,6041	0,0305	0,3545	-0,6659	-0,7132

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Ressalta-se que os “valores exatos”, atribuídos na Tabela 5, foram obtidos pelo programa SIMUL para fins de comparação. Igualmente, ressalta-se no caso da inclusão de LT’s, a maior contribuição à margem de segurança é dada pelo produto da susceptância pelo coeficiente de sensibilidade. Ou seja, não se deve olhar apenas em relação ao coeficiente de sensibilidade. Este detalhe deverá ser melhor abordado em trabalhos futuros.

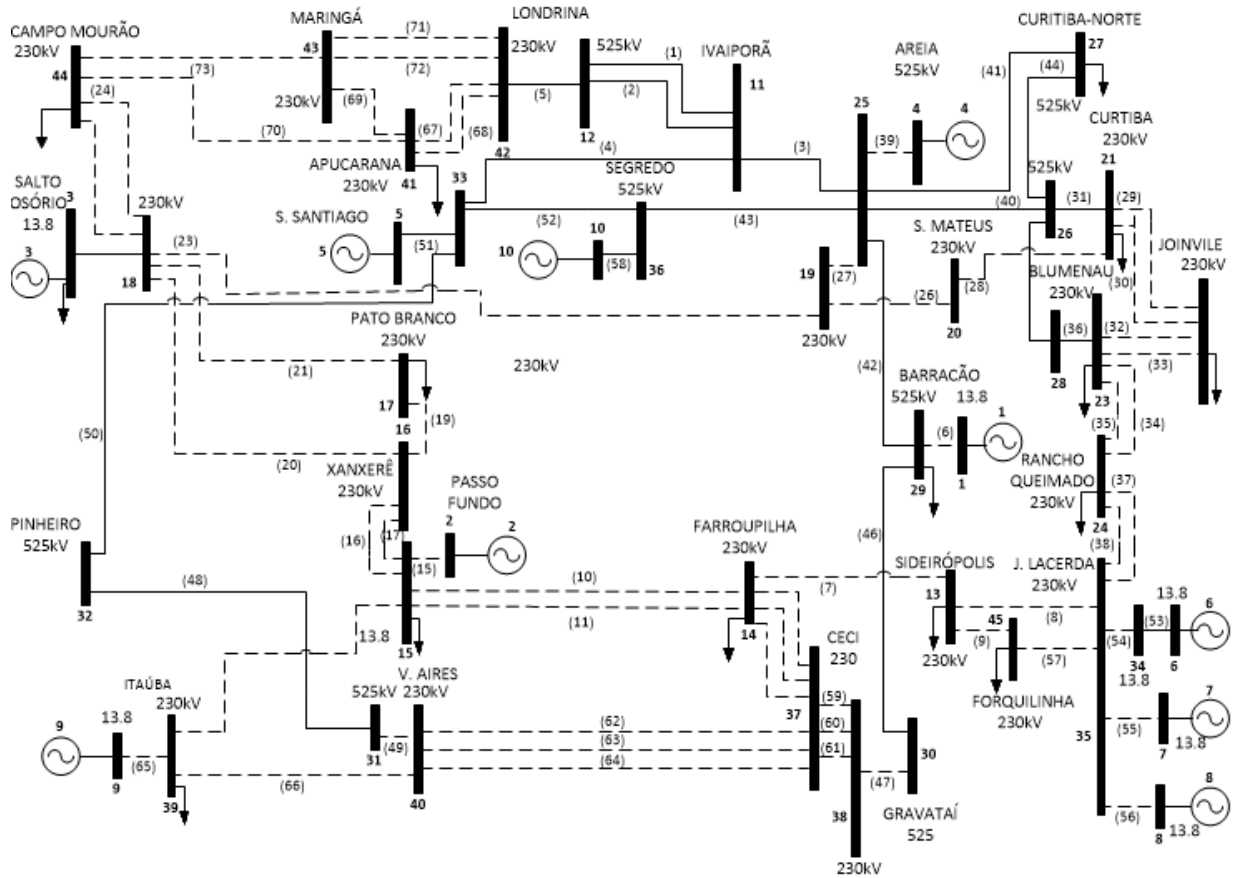
Os resultados apresentados foram obtidos via inclusão de linhas de transmissão em vários pontos da rede elétrica (ou seja, cada LT é incluída isoladamente), considerando-se a falta de curto-circuito mais crítica apresentada na Tabela 4, ou seja, a falta na barra 7 com a retirada da linha de transmissão alocada entre os nós 7 e 8. Neste caso, a margem de segurança é -

1,0204. Observa-se que com a adição da linha de transmissão entre os nós 4 e 7, com susceptância igual a 10,4712, melhorou a margem de segurança para 0,3902 que é desejável, ou seja, a margem de segurança é superior à margem de segurança mínima permissível ( $\mathcal{M}_{\min}$ ). A adição da LT (4-7) foi adotada por corresponder ao maior valor da sensibilidade (0,1271), produzindo um incremento da MS igual a 1,3308 ( $0,1271 \times 10,4712$ ). Igualmente, observa-se que as adições de linhas produziram coeficientes de sensibilidade positiva, ou seja, há sempre uma melhoria da estabilidade. O maior e menor acréscimos positivos da margem de segurança foi 1,3308 [inclusão da LT (4-7)] e 0,3545 [inclusão da LT (4-5)], respectivamente.

### 6.3 SISTEMA DE 10 MÁQUINAS

Para uma segunda aplicação considera-se um sistema, baseado no sistema elétrico da região Sul do Brasil, que será chamado neste texto de sistema Sul reduzido, composto por 10 máquinas síncronas, 45 barras e 73 linhas de transmissão, apresentado em um diagrama unifilar na Figura 9. Para esse sistema, será adotada como barra de referência do sistema a barra 10.

**Figura 9 - Diagrama unifilar do sistema Sul reduzido.**



Fonte: Elaborado pela autora.

Foram realizadas simulações considerando-se faltas do tipo curto-circuito, com tempo de eliminação de defeito igual a 0,15s, ou 9 ciclos, seguido pela perda de uma linha de transmissão. A margem de segurança mínima preestabelecida para o cálculo da estabilidade transitória é  $\mathcal{M}_{min} = 0,3$ , com EDMS  $\gamma_{espc} = 1$  e passo de integração de 0,01.

Os dados das máquinas de potência mecânica ( $P_m$ ), reatância ( $x_d$ ), reatância transitória ( $x'_d$ ) e constante de inércia ( $H(s)$ ), dados em pu, referentes a uma base de 100 MVA são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Dados das Máquinas Síncronas.**

(continua)

Máquina Síncrona	Potência Mecânica (pu)	Reatância		Constante de Inércia $H(s)$
		$x_d$ (pu)	$x'_d$ (pu)	
1	6,5000	0,0367	0,0367	30,44
3	10,5000	0,0284	0,0284	38,34

**Tabela 6 - Dados das Máquinas Síncronas.**

(conclusão)

Máquina Síncrona	Potência Mecânica (pu)	Reatância		Constante de Inércia $H(s)$
		$x_d$ (pu)	$x'_d$ (pu)	
4	11,1000	0,0241	0,0241	62,25
5	13,2500	0,0243	0,0243	55,24
6	0,9000	0,1352	0,1352	4,37
7	1,2000	0,1534	0,1534	6,80
8	2,1400	0,0800	0,0800	12,50
9	4,9000	0,0432	0,0432	20,24
10	Referência	0,0216	0,0216	62,46

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 7, estão relacionados os dados das barras de carga, referentes às potências elétricas ( $Pe$ ) [ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ )] do sistema dadas por unidade (pu) tomando-se como potência base 100 MVA.

**Tabela 7 - Dados das Barras de Carga.**

(continua)

Barra de Carga	Potência Elétrica (pu)	
	Ativa	Reativa
11	0,0000	-2,1300
12	0,0000	0,0000
13	1,7700	0,6800
14	1,9100	0,4200
15	1,7100	0,1850
16	1,2600	0,4700
17	0,4600	0,1470
18	2,8100	0,5650
19	2,7900	0,6070
20	1,3000	-0,7060
21	4,2700	-1,2500

**Tabela 7 - Dados das Barras de Carga.**

(conclusão)

Barra de Carga	Potência Elétrica (pu)	
	Ativa	Reativa
22	3,1000	0,4100
23	4,2400	0,0940
24	1,1700	0,5310
25	0,0000	0,0000
26	0,0000	-1,4470
27	3,6800	-0,7560
28	0,0000	0,0000
29	1,7400	-1,1380
30	0,0000	-1,5960
31	0,0000	-1,6030
32	0,0000	-1,6150
33	0,0000	0,0000
34	1,2600	0,3980
35	0,0000	0,0000
36	0,0000	0,0000
37	8,1300	1,1000
38	6,1200	-4,5500
39	4,0400	1,3500
40	3,9300	-1,1100
41	2,6200	0,1320
42	2,2900	0,8300
43	1,8400	-0,3980
44	1,3900	-0,4630
45	0,9010	-0,4470

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Os dados referentes às linhas de transmissão estão enumerados na Tabela 8. As impedâncias série são dadas em pu.

**Tabela 8 - Dados do Sistema de Transmissão.**

(continua)

Elemento	Barra Inicial	Barra Final	Impedância Série (pu)
1	11	12	0,0007+j 0,0145
2	11	12	0,0007+j 0,0145
3	11	25	0,0018 +j 0,0227
4	11	33	0,0014 + j 0,0204
5	12	42	0,0000 + j 0,0063
6	1	29	0,0000 +j 0,0136
7	13	14	0,0386 + j 0,1985
8	13	35	0,0096 + j 0,0491
9	13	45	0,0033 + j 0,0167
10	14	15	0,0463 + j 0,2378
11	14	15	0,0463+j 0,2378
12	14	37	0,0177 +j 0,0910
13	14	37	0,0177 + j 0,0910
14	14	37	0,0177 + j 0,0910
15	2	15	0,0000+j 0,0460
16	15	16	0,0163 + j 0,0835
17	15	16	0,0163 + j 0,0835
18	15	39	0,0250 + j 0,1548
19	16	17	0,0163 + j 0,0835
20	16	18	0,0316 + j 0,1621
21	17	18	0,0153 + j 0,0861
22	3	18	0,0000 + j 0,0114
23	18	19	0,0294 + j 0,1176
24	18	44	0,0344 + j 0,1760
25	18	44	0,0344 + j 0,1760
26	19	20	0,0245 + j 0,1256
27	19	25	0,0000 + j 0,0300
28	20	21	0,0088 + j 0,0415
29	21	22	0,0182 + j 0,0935
30	21	22	0,0182 + j 0,0935

**Tabela 8 - Dados do Sistema de Transmissão.**

(continuação)

Elemento	Barra Inicial	Barra Final	Impedância Série (pu)
31	21	26	0,0000 + j 0,0062
32	22	23	0,0154 + j 0,0776
33	22	23	0,0154 + j 0,0776
34	23	24	0,0216 + j 0,1105
35	23	24	0,0216 + j 0,1105
36	23	28	0,0000 + j 0,0062
37	24	35	0,0180 + j 0,0920
38	24	35	0,0180 + j 0,0920
39	4	25	0,0000 + j 0,0067
40	25	26	0,0019 + j 0,0280
41	25	27	0,0019 + j 0,0274
42	25	29	0,0014 + j 0,0195
43	25	36	0,0005 + j 0,0070
44	26	27	0,0005 + j 0,0069
45	26	28	0,0012 + j 0,0175
46	29	30	0,0021 + j 0,0309
47	30	38	0,0000 + j 0,0062
48	31	32	0,0022 + j 0,0300
49	31	40	0,0000 + j 0,0062
50	32	33	0,0014 + j 0,0195
51	5	33	0,0000 + j 0,0114
52	33	36	0,0005 + j 0,0070
53	6	34	0,0000 + j 0,0871
54	34	35	0,0000 + j 0,0590
55	7	35	0,0000 + j 0,0701
57	35	45	0,0129 + j 0,0657
56	8	35	0,0000 + j 0,0450
58	10	36	0,0000 + j 0,0068



**Tabela 8** - Dados do Sistema de Transmissão.

(conclusão)

Elemento	Barra Inicial	Barra Final	Impedância Série (pu)
59	37	38	0,0022 + j 0,0111
60	37	38	0,0022 + j 0,0111
61	37	38	0,0022 + j 0,0111
62	37	40	0,0207 + j 0,0933
63	37	40	0,0207 + j 0,0933
64	37	40	0,0207 + j 0,0933
65	9	39	0,0000 + j 0,0236
66	39	40	0,0202 + j 0,1129
67	41	42	0,0125 + j 0,0640
68	41	42	0,0089 + j 0,0461
69	41	43	0,0110 + j 0,1184
70	41	44	0,0229 + j 0,1174
71	42	43	0,0172 + j 0,0884
72	42	43	0,0172 + j 0,0884
73	43	44	0,0181 + j 0,0929

Fonte: Elaborado pela autora.

Para realizar os cálculos de estabilidade transitória, os dados das Tabelas 6, 7 e 8 foram apresentados como parâmetros de entrada para o programa SIMUL, que gerou os dados do fluxo de potência e uma lista de 19 contingências, sendo a mais crítica delas, o curto-circuito na barra 18, provocando a perda da linha que liga a barra 18 à barra 19, conforme mostrado na Tabela 9.

**Tabela 9** - Lista de contingências ordenadas por severidade.

(continua)

Nº da Falta	Barra sob curto-circuito ( $\rho$ )	Elemento retirado ( $\alpha - \beta$ )		Estado Crítico		Energia (Eliminação de Falta)	Margem de Segurança
		$\alpha$	$\beta$	$t_{crit}(s)$	Energia Crítica		
6	18	18	19	0,0800	1,7563	5,1053	-1,9068

**Tabela 9** - Lista de Contingências ordenadas por severidade.

(conclusão)

Nº da Falta	Barra sob curto-circuito ( $\rho$ )	Elemento retirado ( $\alpha - \beta$ )		Estado Crítico		Energia (Eliminação de Falta)	Margem de Segurança
		$\alpha$	$\beta$	$t_{crit}(s)$	Energia Crítica		
7	18	16	18	0,1300	3,7532	5,1435	-0,3704
8	18	18	44	0,1400	4,4634	5,1997	-0,1650
18	39	39	40	NFE	-	1,9757	-
19	39	15	39	NFE	-	2,2497	-
16	33	33	36	0,2700	11,9808	2,9180	0,7564
4	15	14	15	0,3200	7,1024	1,1359	0,8401
14	29	29	30	0,3500	16,2117	2,3961	0,8522
17	35	35	45	NFE	-	1,1522	-
5	17	16	17	0,5800	4,5818	0,5532	0,8793
2	13	13	45	0,6100	9,6579	0,5160	0,9466
3	13	13	35	0,5900	8,4115	0,4012	0,9523
10	25	11	25	0,6000	45,5941	1,7217	0,9622
11	25	25	29	0,8000	39,5096	1,1255	0,9715
13	25	25	27	0,8300	50,4561	1,4004	0,9722
12	25	25	26	0,8900	53,5866	1,3853	0,9741

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Observação: A designação “NFE” significa “Não Foi Encontrado”. Trata-se dos casos considerados como hiperestáveis, ou seja, com o tempo crítico ( $t_{crit}$ ) muitíssimo elevado.

As simulações, via método PEBS iterativo, apontaram a falha mais crítica correspondente a um curto-circuito na barra 18 com a saída de operação da LT (18-19). Por uma questão de uniformidade dos procedimentos adotou-se, para este experimento, os mesmos parâmetros adotados no experimento com o sistema de 9 barras.

Considerando a margem de segurança mínima  $\mathcal{M}_{min} = 0,3$  e o EDMS igual a 1, reduz-se o número de contingências a serem monitoradas a três contingências: as de número 6, 7 e 8, sendo a mais crítica a número 6. Então, pela Tabela 9, a margem inicial é  $\mathcal{M}^A = -1,9068$ . Portanto, tem-se a margem alvo  $\mathcal{M}^B = 0,4534$ . Isto significa que se pode considerar o modelo linearizado para obter resposta até o valor da margem de segurança em torno de 0,5. Foram realizados 57 testes considerando a configuração inicial da rede, com a perda da

linha sob curto-circuito, e a inclusão de uma linha de transmissão paralela às linhas já existentes.

Na Tabela 10, estão relacionados os resultados considerando-se o cálculo dos coeficientes de sensibilidade em relação as 4 adições (não simultâneas) de LT's que apresentaram os melhores resultados relativos à melhoria da segurança do sistema. Os cálculos dos coeficientes de sensibilidade

**Tabela 10** - Resultados das simulações ordenados pelo valor da margem de segurança.

Elemento Adicionado		Susceptância $B_l$ (pu)	$\frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial B_l}$	Margem de Segurança
$u$	$v$			
18	19	8,0000	0,2554	0,1365
3	18	87,7193	0,0125	-0,8062
16	18	5,9432	0,1830	-0,8194
18	44	5,4727	0,1967	-0,8305

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Para o sistema Sul reduzido foram realizadas simulações de inclusões de linhas paralelas as linhas já existentes com valores de impedância equivalentes às impedâncias das LT's já existentes. Na Tabela 10, são relacionados os melhores resultados, do ponto de vista da sensibilidade da margem de segurança, apresentados pelas simulações.

O melhor resultado obtido refere-se à inclusão de uma linha paralela à LT (18–19). O resultado obtido foi o deslocamento da margem de segurança, do valor inicial igual a -1,9068 para o valor final igual a 0,1365 (cálculo obtido via o programa SIMUL). Os coeficientes de sensibilidade da margem de segurança relativa a essa linha é a maior entre as sensibilidades. Além disso, a inclusão desta LT melhorou não apenas a margem de segurança associada a referida contingência, mas também as demais margens, como podem ser constatadas na Tabela 11.

**Tabela 11** - Dados de estabilidade transitória, considerando a inclusão da linha de transmissão 18 - 19.

Número da Falta	Barra sob curto-circuito ( $\rho$ )	Elemento retirado ( $\alpha - \beta$ )		Estado Crítico		Energia (Eliminação de Falta)	Margem de Segurança
		$\alpha$	$\beta$	$t_{crit}(s)$	Energia Crítica		
6	18	18	19	0,16	5,6839	4,9081	0,1365
7	18	16	18	0,16	5,7631	4,9589	0,1395
8	18	18	44	0,17	6,7130	5,0134	0,2532
19	39	15	39	NFE	-	2,2281	-
16	33	33	36	NFE	-	2,9117	-
14	29	29	30	0,34	15,2307	2,4269	0,8407
4	15	14	15	0,32	6,9760	1,0675	0,8470
17	35	35	45	NFE	-	1,1467	-
11	25	25	29	0,45	16,9750	1,0976	0,9353
2	13	13	45	0,61	9,6457	0,5153	0,9466
3	13	13	35	0,59	8,4046	0,4010	0,9523
10	25	11	25	0,63	46,8427	1,6576	0,9646
13	25	25	27	0,93	55,5944	1,3595	0,9760

**Fonte:** Elaborado pela autora.

A melhoria apresentada na Tabela 11 nas margens de segurança do sistema sob análise corroboram a eficiência do modelo apresentado nesta pesquisa, no sentido de que a melhor linha a ser incluída, selecionada de acordo com os critérios propostos pelo modelo matemático, apresentou melhorias nas margens de segurança de todas as barras, algumas bastante significativas. Apesar de não se ter alcançado a margem de segurança mínima estabelecida, a inclusão da LT(18 – 19) garantiu estabilidade ao sistema elétrico de uma maneira geral, além disso, se for incluída uma segunda LT, paralelamente a esta, obtém-se uma margem de segurança igual a 0,3508, que é bem próxima da mínima estabelecida.

## 6.4 CONCLUSÃO CAPITULAR

Neste capítulo foram apresentados os resultados de duas aplicações do modelo proposto para o controle de segurança dinâmica, reforço do sistema de transmissão, feitas para o modelo de 9 barras apresentado por Anderson e Fouad (2002) e um sistema baseado no sistema elétrico da região Sul do Brasil, composto por 45 barras.

O controle dinâmico foi determinado via análise de sensibilidade da margem de segurança e consistiu da inclusão de linhas de transmissão.

Foi aplicado o conceito de EDMS a fim de reduzir o número de contingências a serem monitoradas e de determinar valores de referência para a margem de segurança mínima e para a margem alvo. Esse critério contribuiu para a redução do custo computacional, já que reduz o número de simulações a serem executadas quando se reduz o número de monitoramentos de contingências.

Os resultados obtidos para a margem de segurança do sistema após a inclusão de linhas de transmissão são satisfatórios e ilustram a eficiência do controle de segurança empregado, assim como do modelo matemático desenvolvido, já que as inclusões de LTs proporcionaram a melhoria da segurança não só para o elemento sob falta, mas para o sistema de uma maneira geral.

## 7 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa de doutorado, foi apresentado o desenvolvimento de um modelo matemático-computacional, baseado na análise de sensibilidade, com vistas à melhoria da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência. A ação de controle empregada, refere-se à entrada e/ou saída de operação de elementos do sistema de transmissão (mudança estrutural do sistema de transmissão), *e.g.*, inicialmente, limitando-se às linhas de transmissão. Uma vez consolidada esta solução, buscar-se-á propor uma metodologia similar para a inclusão de dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*) (TASK FORCE 3 OF THE IEEE FACTS WORKING GROUP OF DC AND FACTS SUBCOMITEE, 1997). Esta formulação, salvo engano, é original no contexto da literatura especializada.

Um importante resultado desta pesquisa depreende da observação de que o reforço da transmissão (inclusão de linha de transmissão e ou FACTS) tem proporcionado, em regra, a melhoria da estabilidade. Em nenhum experimento realizado, considerando-se a análise da estabilidade transitória nos casos de faltas da modalidade de curto-circuito, observou-se a diminuição da segurança do sistema. Assim, pode-se conjecturar que se trata de um recurso bastante eficiente na operação e, também, no planejamento de sistemas elétricos de potência. Igualmente, deve-se notar que, na maioria dos casos abordados na literatura, o problema referente à melhoria da estabilidade compreende o emprego de ações de controle baseado no redespacho da geração e, em casos extremos, recorrendo-se ao uso do corte de carga. Estas ações, invariavelmente, são de difíceis aplicações, ou seja, no redespacho da geração, as unidades geradoras que são indicadas para produzir a melhoria da segurança, necessitam da redução das suas gerações. Para o atendimento pleno da demanda, em contrapartidas, algumas unidades geradoras deverão aumentar a geração o que produz um efeito contrário. Por conseguinte, tem-se observado que o redespacho de geração tem proporcionado uma menor eficiência (embora seja amplamente usado para fins da análise de segurança), se comparado ao reforço da transmissão. Além disto, o redespacho da geração constitui, quase sempre, numa ação de controle que oferece certa relutância por parte da operação, tendo em vista que resolve um problema, porém, pode causar outras adversidades operacionais. Também, em razão, de

ser uma operação complexa. O corte de carga é bastante eficiente, porém, é algo que as empresas não desejam implementar por razões econômicas e por envolver parte dos consumidores no não atendimento de energia.

## 7.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados desta pesquisa podem ser considerados satisfatórios (do ponto de vista da precisão e rapidez na obtenção das soluções), conforme argumentado anteriormente. Porém, sugerem-se algumas melhorias e procedimentos que podem ser implementados com o propósito de tornar esta proposta mais eficiente:

- 1) no atual estágio do desenvolvimento desta pesquisa, os programas SIMUL e SENSIT são processados separadamente. Sugere-se, então, implementar as ações no problema computacional com vistas à obtenção dos resultados de modo automático;
- 2) realizar estudos considerando o emprego de dispositivos FACTS;
- 3) o modelo proposto nesta pesquisa, o qual empregou a análise de sensibilidade de primeira ordem, pode ser considerado eficiente, conforme pode-se constatar nas simulações realizadas. Sugere-se, entretanto, a realização de estudos procedendo-se algumas simplificações com vistas a tornar este método mais rápido, sem prejudicar a qualidade das soluções. Com isto, pode-se sugerir usar o modelo resultante em outros estudos, como, por exemplo, no planejamento da expansão do sistema elétrico para a realização de casos mais realistas, se comparado aos procedimentos habituais, nesta área, de se levar em conta apenas os critérios estáticos.

## REFERÊNCIAS

- AGHAEI, J. *et al.* Determining potential stability enhancements of flexible AC transmission system devices using corrected transient energy function. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Stevenage, UK, v. 10, n. 2, p. 470-476, 2016. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7407701> . Acesso em: 13 nov. 2017.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. *Power system control and stability*. 2. ed. Iowa: Iowa State University Press, 2002.
- ATHAY, T.; PODMORE, R.; VIRMANI, S. A practical method for the direct analysis of transient stability. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, n. 2, p. 573-584, 1979.
- BOSSETTI, H.; KHAN, S. Transient stability in oscillating multi-machine systems using lyapunov vectors. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 33, n. 2, p. 2078-2086, 2017.
- FERREIRA, W. P. *et al.* Transient stability analysis of electric energy systems via a fuzzy ART-ARTMAP neural network. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 76, n. 6-7, p. 466-475, April 2006.
- FIGUEIREDO, D. G. D. *Equações diferenciais aplicadas*. 3. ed. Rio de Janeiro: IMPA, 2008.
- FONSECA, L. G. S.; DECKER, I. C. Iterative algorithm for critical energy determination in transient stability of power systems. *IFAC Proceedings Volumes*, Melbourne, v. 18, n. 7, p. 419-425, 1985.
- FOUAD, A. A.; VITTAL, V. *Power system transient analysis using the transient energy function method*. Upper Sadle River: Prentice-Hall, 1992.
- HINGORANI, N. G. Flexible AC transmission system. *IEEE Spectrum*, Piscataway, v. 30, n. 4, p. 40-45, April 1993. DOI: 10.1109/6.206621.
- IEEE POWER SYSTEM ENGINEERING COMMITTEE; IEEE TASK FORCE ON TERMS & DEFINITIONS; IEEE SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE SUBCOMMITTEE. Proposed terms & definition for power system stability. *IEEE Transactions on Power Apparatus*, Piscataway, v. 101, n. 7, p. 1894-1898, jul. 1982. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4111536> . Acesso em: 6 dez. 2018.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. New York: McGraw Hill, 1993.
- MARTINEZ-VELASCO, J. A. *Transient stability of power systems: solution techniques, tools and applications*. Chichester: Wiley; IEEE Press, 2015.



MINUSSI, C. R. *Controle de segurança dinâmica em sistemas de energia elétrica*. 1990. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

MINUSSI, C. R. *Formulação de modelos para o controle preventivo dinâmico de sistemas de energia elétrica*. 1995. 85 f. Tese (Livre docência) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 1995.

MINUSSI, C. R.; DE FREITAS FILHO, W. Uma metodologia para o controle de segurança dinâmica de sistemas de energia elétrica. *Controle and Automação*, Campinas, v. 9, n. 2, p. 65-76, 1998.

MINUSSI, C. R.; FREITAS, W. Sensitivity analysis for transient stability studies. *IEEE-Prociding-Generation, Transmission and Distribution*, Piscataway, v. 145, p. 669-674, 1998.

PAI, M. A. *Power system stability*. Amsterdam: North Holland, 1981.

PAVELLA, M.; ERNEST, D.; RUIZ-VEGA, D. *Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control*. New York: Springer, 2000.

RIBBENS-PAVELLA, M. *Transient stability of power systems: theory and practice*. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

RIBBENS-PAVELLA, M.; EVANS, F. J. Direct methods for studying dynamics of large-scale electric power systems: a survey. *Automatica*, Kidlington, v. 21, n. 1, p. 1-21, 1985.

RIBBENS-PAVELLA, M.; LEMAL, B.; PIRARD, W. On-line Operation of Lyapunov criterion for transient stability studies. *IFAC Proceedings Volumes*, Melbourne, v. 10, n. 1, p. 292-296, 1977.

SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, E. M. *Sensitivity analysis*. Chichester, Jonh Wiley & Sons, 2000.

SAVULESCU, S. C. *Real-time stability in power systems: techniques for early detection of the risk of blackout*. Cham: Springer, 2014.

SIMUL. *Simulação de sistemas elétricos de potência, fluxo de potência e a análise de estabilidade transitória*. Ilha Solteira: Unesp/Faculdade de Engenharia/Departamento de Engenharia Elétrica, 1995.

SONG, H.; KEZUNOVIC, M. Stability control using PEBS method and analytical sensitivity of the transient energy margin. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2004, New York. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2004. p. 1153-1158. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1397700>. Acesso em: 18 nov. 2017.

STOTT, B. Decoupled newton load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, v. PAS-91, n. 5, p. 1955-1959, 1972. DOI: 10.1109/TPAS.1972.293524.

TASK FORCE 3 OF THE IEEE FACTS WORKING GROUP OF DC AND FACTS SUBCOMMITTEE. Proposed terms and definitions for flexible AC transmission systems (FACTS). *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 12, n. 4, p. 1848-1853, out. 1997. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=634216&tag=1>. Acesso em: 27 nov. 2017.

TORRES, L. A. B. *Teoria de estabilidade de Lyapunov*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. Disponível em: [http://www.cpdee.ufmg.br/~torres/wp-content/uploads/2018/02/Estabilidade\\_Lyapunov.pdf](http://www.cpdee.ufmg.br/~torres/wp-content/uploads/2018/02/Estabilidade_Lyapunov.pdf). Acesso em: 12 set. 2018.

VARMA, S. FACTS devices for stability enhancements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN COMPUTING AND INTERNET OF THINGS – ICGCIoT, 2015, Greater Noida. *Proceedings...* Danvers: IEEE, 2015. p. 69-74. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7380430>. Acesso em: 18 nov. 2017.

VITTAL, V. E. A. Derivation of stability limits using analytical sensitivity of the transient energy margin. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 4, n. 4, p. 1363-1372, 1989. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=41686>. Acesso em: 18 nov. 2017.

WAGH, S. *Power system transient stability enhancement*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2013.

ZAREI, M.; FOUAD, A. A. *power system control and stability*. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2002.

ZWEIGLE, G. C. Transient instability mitigation for complex contingencies with computationally constrained cost-based control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 7, n. 4, p. 1961-1969, 2016.