

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MELHORIA DE SEGURANÇA DINÂMICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
ATRAVÉS DO CONTROLE DE EXCITAÇÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ARLAN LUIZ BETTIOL

FLORIANÓPOLIS, JUNHO/1992


MELHORIA DE SEGURANÇA DINÂMICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
ATRAVÉS DO CONTROLE DE EXCITAÇÃO

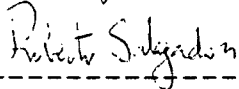
ARLAN LUIZ BETTIOL

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE


MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE SISTEMAS DE  
POTÊNCIA, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS -  
GRADUAÇÃO

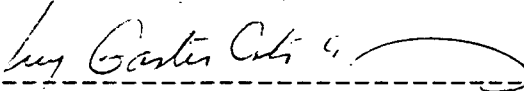
  
-----  
LUIZ GONZAGA DE SOUZA FONSECA, D.Sc. - ORIENTADOR

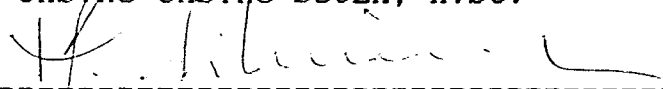
  
-----  
P/ JOAO PEDRO ASSUMPCÃO BASTOS, D'ETAT - COORDENADOR DE CURSO

BANCA EXAMINADORA

  
-----  
LUIZ GONZAGA DE SOUZA FONSECA, D.Sc. - PRESIDENTE

  
-----  
CARLOS ROBERTO MINUSSI, D.Sc.

  
-----  
LUIZ GASTÃO CASTRO SOUZA, M.Sc.

  
-----  
HAMILTON MEDEIROS SILVEIRA, D'ETAT

A Ele .

*Aos meus pais, Vivino e Adorotéa, por  
tudo que representam para mim.*

*A Jane, minha esposa, e ao meu filho,  
ainda por nascer.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca pelo acompanhamento e sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Roberto Minussi que, apesar da distância física, tanto incentivo deu-me nos momentos mais difíceis do trabalho.

Ao Prof. Ildemar Cassana Decker, pela orientação dada no início do curso de Pós-Graduação.

A todos os demais professores e colegas da Pós-Graduação que, de diferentes formas, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Jane, fonte de tanto estímulo e compreensão que me acompanharam durante toda a realização do trabalho.

Ao Departamento de Planejamento da Expansão (DPL) da ELETROSUL, em especial à Divisão de Planejamento da Transmissão (DVPT) onde exerço minha atividade profissional, pelo incentivo e sugestões dados por alguns dos membros do seu corpo técnico.

A Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio técnico e à CAPES pelo apoio financeiro no início do curso.

## SUMARIO

1. Introdução .....	1
2. Descrição do Problema de Melhoria de Segurança Dinâmica .....	8
2.1. Introdução .....	8
2.2. Modelos Matemáticos para Solução da Estabilidade Transitória .....	9
2.2.1. Modelo com Referência ao Centro de Ângulos .....	9
2.2.2. Análise da Estabilidade Transitória pelo Método Direto de Liapunov .....	16
2.2.3. Método SLEP .....	22
2.2.4. Margem de Segurança Dinâmica .....	26
2.3. Melhoria de Segurança Dinâmica .....	28
2.3.1. Apresentação do Problema de Melhoria de Segurança Dinâmica .....	28
2.3.2. Estado da Arte em Melhoria de Segurança Dinâmica..	30
2.4. Conclusão .....	37
3. Formulação do Problema de Melhoria de Segurança Dinâmica Através da Análise de Sensibilidade .....	39
3.1. Introdução .....	39
3.2. Influência da Tensão na Estabilidade Transitória .....	40
3.2.1. Considerações Preliminares .....	40

3.2.2. Analogia com o Critério de Áreas Iguais .....	41
3.3. Proposta para a Solução do Problema de Melhoria de Segurança Dinâmica .....	45
3.4. Cálculo da Sensibilidade da Margem de Segurança .....	47
3.4.1. Sensibilidade da Energia Cinética em Relação à Velocidade Angular .....	50
3.4.2. Sensibilidade da Energia Potencial em Relação à Potência Mecânica .....	50
3.4.3. Sensibilidade da Potência Mecânica em Relação à Tensão Interna Pré-Falta .....	51
3.4.4. Sensibilidade da Energia Potencial em Relação à Posição Angular .....	52
3.4.5. Sensibilidade da Energia Potencial em Relação à Posição Angular Pós-Falta .....	52
3.4.6. Sensibilidade da Parcela Integral de Potência Elétrica em Relação à Tensão Interna Pré-Falta ...	52
3.4.7. Sensibilidade da Posição e Velocidade Angulares em Relação à Tensão Interna Pré-Falta .....	53
3.4.8. Sensibilidade da Energia Crítica Total Relativa à Tensão Interna Pré-Falta .....	58
3.5. Algoritmo Conceitual para a Solução do Problema de Melhoria de Segurança Dinâmica .....	60
3.6. Conclusão .....	62
4. Uso da Análise de Sensibilidade na Melhoria de Segurança Dinâmica .....	64

4.1. Introdução .....	64
4.2. Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão das Barras Externas de Geração .....	64
4.3. Melhoria de Segurança Dinâmica Via Alteração das Tensões Terminais .....	69
4.3.1. Alteração das Tensões Terminais Via Otimização....	70
4.3.2. Determinação das Contingências a Serem Monitoradas	72
4.3.3. Algoritmo de Modificação da Tensão Terminal .....	73
4.3.4. Considerações Sobre o Modelo Desenvolvido .....	75
4.4. Conclusão .....	77
5. Aplicações da Metodologia Proposta .....	78
5.1. Introdução .....	78
5.2. Sistema de 10 Máquinas .....	78
5.2.1. Considerações Preliminares .....	78
5.2.2. Processo Iterativo de Melhoria de Segurança Dinâmica .....	82
5.2.3. Análise de Resultados .....	99
5.3. Sistema de 25 Máquinas .....	100
5.3.1. Considerações Preliminares .....	100
5.3.2. Processo Iterativo de Melhoria de Segurança Dinâmica .....	102
5.3.3. Análise de Resultados .....	123
5.4. Conclusão .....	123



6. Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos .....	125
6.1. Conclusões .....	125
6.2. Sugestões para Futuros Trabalhos .....	127
 Referências Bibliográficas .....	 128
 Apêndice A - Diagrama Unifilar e Dados do Sistema de 10 Máquinas	 135

## RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para a Melhoria de Segurança Dinâmica em sistemas elétricos de potência, considerando-se a estabilidade transitória para faltas tipo curto-circuito trifásico com o sistema descrito pelo modelo clássico de máquinas e variáveis referidas ao centro de ângulos.

O diagnóstico da estabilidade transitória é efetuado através do método SLEP (Superfície Limite de Energia Potencial), em virtude da preservação da topologia original da rede, tempo computacional reduzido e precisão comparável aos métodos de simulação numérica.

Através da Análise de Sensibilidade, é desenvolvido um método de Melhoria de Segurança Dinâmica empregando-se o conceito de margem de segurança. Determina-se um modelo incremental entre a variação da margem de segurança e o vetor de tensões pré-falta das barras externas de geração. Utilizando-se a alteração das tensões terminais das máquinas síncronas como ação de controle, é proposto um algoritmo heurístico que quantifica as alterações de tensão nas máquinas, de modo que os efeitos dos transitórios eletromecânicos sejam conduzidos a níveis considerados seguros.

São apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta considerando-se dois sistemas de potência baseados na configuração da região Sul do Brasil (10 máquinas/45 barras) e das regiões Sul-Sudeste (25 máquinas / 496 barras) do Brasil.

## ABSTRACT

This work presents a methodology for Dynamic Security Improvement in Power Systems considering the transient stability to three-phases short-circuit fault and the system represented by synchronous machine classic model and variables referred to center of angle.

The transient stability diagnostic is performed by the PEBS (Potential Energy Boundary Surface) method because its dynamic model preserves the network topology, reduced computational time and its accuracy is comparable to numerical simulation methods.

Through Sensitivity Analysis, a Dynamic Security Improvement Method is developed using the security margin concept. In this way, it creates an incremental model of the security margin change based in the voltages vector of the external generation bus. Utilizing control actions over the external voltage change in synchronous machines, is proposed an heuristic algorithm to estimate machines voltage changes such that the electromechanical transient effects are conducted to levels considered secure.

The proposed methodology is presented considering two power systems : Simplified South Brazilian System (10 machines / 45 bus) and Simplified South- Southeast Brazilian System (25 machines / 496 bus).

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O funcionamento e operação dos atuais sistemas elétricos de potência interligados, projetados com o objetivo de suprir o mercado consumidor de energia elétrica de forma confiável e flexível, tiveram sua complexidade aumentada no decorrer dos anos face à elevação de sua dimensão física como consequência do crescimento do mercado e por ser descrito por modelos matemáticos intrinsecamente não-lineares.

Este comportamento de natureza não-linear implica na necessidade de uma permanente monitoração do desempenho global do sistema frente à eventuais perturbações (contingências), como curto-circuitos e/ou perda de equipamentos. Nos casos onde é detetada instabilidade transitória para alguma dessas contingências ou violação dos limites operativos dos equipamentos, torna-se necessária a adoção de medidas corretivas que conduzam o sistema a um estado de operação, dito estado de operação segura, onde não há instabilidade ou violação de limites.

Neste trabalho, além dos limites de carregamento de linhas e transformadores, despachos de usinas, tensões nodais, etc. monitorados em regime permanente de operação, considerar-se-á adicionalmente os aspectos dinâmicos do sistema. Desta forma, a questão de segurança a ser tratada pela metodologia proposta, também

agrupará os efeitos provenientes de perturbações na rede que ocasionam oscilações acentuadas nas posições angulares das máquinas síncronas (estabilidade transitória), o que pode provocar a perda de sincronismo entre elas, causando a interrupção do fornecimento de energia elétrica. Tal controle, que leva em conta o efeito transitório do sistema, é denominado Controle ou Melhoria de Segurança Dinâmica.

A análise de estabilidade transitória é correntemente efetuada mediante a solução numérica de um conjunto de equações diferenciais e algébricas, que descrevem o movimento dos rotores das máquinas do sistema, através da observação das curvas de oscilação da posição angular destes rotores ao longo do tempo. Tal metodologia conduz a resultados precisos, não apresentando, em geral, restrições quanto a complexidade dos modelos matemáticos adotados na análise. Contudo, tem como inconveniente principal a falta de uma quantificação do grau de estabilidade ou instabilidade do sistema associado a determinada contingência sob estudo, além de ser dispendioso em termos computacionais.

O Método Direto de Liapunov apresenta-se como uma metodologia alternativa a esse procedimento, permitindo uma análise qualitativa da estabilidade transitória. Nos casos de modelo clássico, pode-se obter resultados satisfatórios com tempo computacional reduzido (Fonseca et al. [17], Ribbens-Pavella & Evans [39]). Entretanto, apesar dos esforços dispendidos por pesquisadores na elaboração de funções de Liapunov mais abrangentes, não propicia atualmente

resultados concretos no caso de modelos mais sofisticados para a análise de estabilidade transitória, como, por exemplo, a inclusão do efeito dos reguladores de tensão e velocidade. Contudo, dentro dos objetivos deste trabalho, o Método Direto de Liapunov constitui atualmente uma técnica que proporciona os alicerces básicos para a elaboração de metodologias visando a Melhoria de Segurança Dinâmica.

Considerando-se estudos para solução de casos críticos e/ou estudos para estimativa de transferência de energia entre áreas no ambiente de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência, pode-se empregar o modelo clássico de máquinas. Assim, nas aplicações onde o modelo clássico de máquinas é considerado satisfatório, pode-se usar o procedimento baseado nas funções energia conforme comentado abaixo.

Neste trabalho, portanto, o estudo de estabilidade transitória será efetuado através do Método Direto de Liapunov empregando-se funções tipo energia, representando-se a dinâmica do sistema através do modelo clássico combinado com o uso de métodos de simulação numérica de equações diferenciais usando-se expansões em séries de potência.

Sendo recente, na literatura especializada, o aparecimento de métodos que tratam da Melhoria de Segurança Dinâmica, o número de publicações nesta área é ainda reduzido. Tais metodologias podem ser reunidas em três grupos distintos :

- Grupo 1 - Reúne as metodologias baseadas no Método Direto de Liapunov com seus domínios de estabilidade estabelecidos pelo método do politopo (Doraiswami & Fonseca [09]). A Melhoria de Segurança Dinâmica consiste no emprego de ações de controle tipo redespacho de geração e/ou alívio de carga visando aumentar o domínio de estabilidade para as contingências consideradas instáveis. Destacam-se os trabalhos de Fonseca et al. [20] e [22], Cabreira [05], Fonseca & Minussi [18], Minussi [32] e Montoya [35].
- Grupo 2 - Reúne as metodologias geradas a partir do modelo dinâmico com preservação da topologia da rede, conforme proposto por Bergen & Hill [04]. O desenvolvimento do método de Melhoria de Segurança Dinâmica é baseado no conceito de deslocamento para um valor menos crítico do "cut-set" vulnerável associado a uma contingência instável, propiciando, segundo os autores, uma melhoria de segurança. Destacam-se os trabalhos de Chandrashekhar & Hill [08] e Chandrashekhar [07].
- Grupo 3 - Reúne as metodologias desenvolvidas da generalização do equivalente máquina síncrona X barra infinita para sistemas multimáquinas. Este modelo é deduzido confrontando-se a dinâmica do grupo de máquinas críticas, isto é, aquelas que apresentam excursões angulares elevadas durante o período transitório, com o grupo de máquinas não críticas. O sucesso desta análise e da Melhoria de Segurança Dinâmica

depende, em suma, do conhecimento prévio destas máquinas críticas, que podem ser conhecidas com precisão somente após a conclusão da análise. Resultados comparativos entre as principais técnicas de análise de estabilidade transitória através do Método Direto de Liapunov citados em Fonseca et al. [17], indicam que as premissas básicas desses métodos nem sempre são válidas, podendo-se incorrer em erros consideráveis. Destacam-se, neste grupo, os trabalhos de Xue et al. [44], Xue & Ribbens-Pavella [45], Lemmon et al. [30], El-Kady et al. [13] e Vittal et al. [43].

Destacando a importância do problema de Melhoria de Segurança Dinâmica nos sistemas elétricos de potência e considerando os atuais resultados, este trabalho visa desenvolver um algoritmo de Melhoria de Segurança Dinâmica considerando faltas severas tipo curto-circuito trifásico seguido de perda do equipamento sob falta.

Esta metodologia será desenvolvida através do uso de análise de sensibilidade de primeira ordem (Frank [26], Minussi [32]) e de um algoritmo heurístico de maximização da segurança dinâmica, o qual procurará encontrar soluções que satisfaçam os aspectos estáticos e dinâmicos, atendendo a um critério de mínimo deslocamento do ponto de operação do sistema. A análise de estabilidade transitória será efetuada pelo método SLEP (Superfície Limite de Energia Potencial) (Decker[10], Fonseca & Decker [16]), o qual constitui-se numa extensão do Método Direto de Liapunov. A rapidez computacional e a



qualidade dos resultados fornecidos pelo método SLEP, constituem-se nos requisitos primordiais ao desenvolvimento de uma metodologia eficiente de Melhoria de Segurança Dinâmica.

A proposta de solução para o problema de Melhoria de Segurança Dinâmica consiste na determinação da sensibilidade da margem de segurança obtida com o método SLEP em função das tensões nas barras PV (barras de geração), constituindo-se numa variante do método proposto por Minussi [32] que tratava da Melhoria de Segurança Dinâmica através do redespacho de geração. Tal vetor de sensibilidade indica em que barras de geração, a mudança de tensão afeta mais diretamente a margem de segurança do sistema.

Apesar de não afetar as metas energéticas em sistemas predominantemente hidrelétricos, que poderão ser compensadas quando o sistema estiver numa situação operativa mais segura, o despacho das usinas não se apresenta hierarquicamente como a medida corretiva mais usual na Melhoria de Segurança Dinâmica. Na operação de sistemas elétricos de potência, o procedimento mais atrativo neste sentido, consiste em buscar, em primeira instância, uma alternativa que possibilite a melhoria da margem de segurança sem recorrer-se ao redespacho de geração nas usinas. A mudança do perfil de tensão das barras de geração pode representar uma ação de controle atrativa deste ponto de vista, uma vez que tem influência considerável na margem de segurança e não afeta significativamente o despacho das usinas e, conseqüentemente, o ponto de operação do sistema.

Com o objetivo de expor estas idéias, o texto está organizado da seguinte maneira : No Capítulo 2 são apresentados o modelo matemático do sistema com referência ao centro de ângulos e preservação da estrutura original da rede, os conceitos básicos da análise de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência pelo Método Direto de Liapunov empregando-se o método SLEP, finalizando-se com a apresentação do problema de Melhoria de Segurança Dinâmica (formulação do problema, estado da arte e análise crítica das principais referências). No Capítulo 3, são feitas considerações sobre a influência da tensão na margem de segurança do sistema, sendo apresentada a metodologia proposta para Melhoria de Segurança Dinâmica através da análise de sensibilidade de primeira ordem. No Capítulo 4, utilizam-se os indicadores de sensibilidade na Melhoria de Segurança Dinâmica através do emprego de um procedimento heurístico de alteração de tensão nas barras de geração. No Capítulo 5, são apresentados os resultados provenientes da aplicação da metodologia em sistemas baseados no sistema elétrico da região Sul do Brasil (10 máquinas / 45 barras) e das regiões Sul-Sudeste do Brasil (25 máquinas / 496 barras). Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho, assim como sugestões para futuras pesquisas.

## CAPÍTULO 2

### DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE MELHORIA DE SEGURANÇA DINÂMICA

#### 2.1. Introdução

Neste capítulo, são descritos os conceitos teóricos que definem o problema de Melhoria de Segurança Dinâmica, quando são detetadas situações inseguras na operação do sistema, conforme as referências [10,32].

Inicialmente, são apresentados os modelos matemáticos que descrevem a dinâmica dos sistemas elétricos de potência através do modelo clássico com referência ao centro de ângulos e com inclusão das condutâncias de transferência. Tal modelo preserva a estrutura original da rede, sendo válido para a análise de perturbações tipo curto-circuito trifásico, perda de equipamento, etc..

São mostrados ainda os conceitos básicos da análise de estabilidade transitória pelo Método Direto de Liapunov. Tal método, ao contrário dos métodos convencionais de simulação numérica, permite o diagnóstico direto da estabilidade transitória, dispensando a análise das curvas de oscilação das posições angulares das máquinas síncronas.

Em seguida, é descrita sucintamente a concepção básica do método SLEP, bem como o conceito de margem de segurança, citando-se suas vantagens, se comparado com a análise via integração numérica das equações diferenciais, quando associado ao problema de Melhoria de

Segurança Dinâmica.

Finalizando, é apresentado o problema de Melhoria de Segurança Dinâmica, ressaltando-se sua formulação básica e um resumo do estado da arte nesta área.

## 2.2. Modelos Matemáticos para Solução da Estabilidade Transitória

### 2.2.1. Modelo com Referência ao Centro de Ângulos

A equação diferencial que descreve o movimento do rotor da  $i$ -ésima máquina síncrona num sistema elétrico de potência constituído por  $n$  máquinas síncronas, considerando-se o modelo clássico, é dado por [10,32] :

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= w_i \\ M_i \dot{w}_i &= Pm_i - Pe_i - d_i w_i, \quad i \in N. \end{aligned} \quad (2.2.1.1)$$

As grandezas e parâmetros do modelo definido em (2.2.1.1), onde o índice  $i$  refere-se ao número da máquina no modelo, são definidos por :

$$M_i = 2 H_i / 2 \pi f_o$$

$$H_i = \text{constante de inércia [s]}$$

$$f_o = \text{frequência nominal da rede [60 Hz]}$$

$$d_i = \text{coeficiente de amortecimento [pu]}$$

$$\delta_i = \text{posição angular do rotor medida em relação a um eixo que gira em velocidade síncrona [rad.elét.]}$$

$$w_i = \text{desvio de velocidade angular da máquina [rad.elét./s]}$$

$$Pm_i = \text{potência mecânica de entrada [pu]}$$

$P_{e_i}$  = potência elétrica entregue pela máquina síncrona [pu]

$N = \{ 1, 2, \dots, n \}$  = conjunto de índices das máquinas do sistema.

O ponto colocado sobre as variáveis na equação (2.2.1.1) representa o operador diferencial (d/dt), isto é,  $\dot{x} = dx/dt$ , onde t é o tempo em s.

O modelo clássico descrito pela equação (2.2.1.1) baseia-se nas hipóteses usualmente adotadas na literatura [10,15,23,32,37] :

- A máquina síncrona é modelada por uma fonte de tensão constante (determinada a partir de um fluxo de potência pré-falta) em série com sua reatância transitória de eixo direto;
- O ângulo de fase atrás da reatância transitória de eixo direto (ângulo elétrico) coincide com o ângulo do rotor (ângulo mecânico);
- A potência mecânica de entrada da máquina síncrona mantém-se constante durante o período transitório;
- Despreza-se os efeitos dos reguladores de tensão e velocidade e dos enrolamentos amortecedores e
- As cargas são representadas por impedâncias constantes que são determinadas a partir de um fluxo de potência pré-falta .

Sendo o sincronismo um fenômeno físico essencialmente associado ao movimento relativo entre as máquinas síncronas do sistema, foi proposto na literatura um tipo de referência diferente da referência síncrona [10,32]. Usando-se esta formulação, é conveniente empregar-se o centro de ângulos como referência para os ângulos face às diversas vantagens que apresenta, entre as quais, a facilidade

para se definir e identificar estabilidade transitória [10,32], conforme feito adiante.

Desta forma, utilizando-se as variáveis definidas em (2.2.1.1), o centro de angulos é definido por [32,41] :

$$\delta_o = \frac{1}{MT} \sum_{j \in N} M_j \delta_j \quad (2.2.1.2)$$

onde :

$$MT = \sum_{j \in N} M_j .$$

Uma vez definido o centro de angulos e se os amortecimentos proporcionais ao desvio de velocidade forem considerados uniformes durante o período transitório ( $d_i / M_i = d_j / M_j$ ,  $i, j \in N$ ), o que tornará a equação mais simples e desacoplada [10,32], o modelo que descreve o movimento da  $i$ -ésima máquina síncrona em relação ao centro de angulos durante o período transitório é expresso por [02,10,16,23, 32,37] :

$$\begin{aligned} \theta_i &= \omega_i \\ M_i \dot{\omega}_i &= Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{MT} PCA - d_i \omega_i, \quad i \in N \end{aligned} \quad (2.2.1.3)$$

onde :

PCA = potência acelerante do centro de angulos

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

$\theta_i$  = posição angular da  $i$ -ésima máquina síncrona em relação ao centro de angulos

$$= \delta_i - \delta_o \quad (2.2.1.4)$$

$\omega_i$  = velocidade angular da  $i$ -ésima máquina síncrona em relação ao centro de angulos

$$= \omega_i - \omega_o \quad (2.2.1.5)$$

$$\omega_o = \dot{\delta}_o$$

O modelo com referência ao centro de ângulos da equação (2.2.1.3) possui as seguintes propriedades [10,32,37,41] :

Propriedade 1. A potência acelerante medida em relação ao centro de ângulos e avaliada no ponto de equilíbrio síncrono estável, é nula.

Propriedade 2.  $\sum_{j \in N} M_j \theta_j = 0$  ,  $\sum_{j \in N} M_j \dot{\theta}_j = 0$  e  $\sum_{j \in N} M_j \ddot{\theta}_j = 0$ . (2.2.1.6)

Em decorrência de sua definição, os ângulos  $\theta_i$  são linearmente dependentes, observando-se o mesmo em relação às velocidades  $\omega_i$ . Portanto, o conhecimento de  $(2n-2)$  variáveis de estado, permite o cálculo das 2 variáveis restantes através de (2.2.1.6) [32].

Admitindo-se, no sentido de se manter a estrutura original da rede, que a conexão entre as máquinas síncronas e a rede é feita sem redução às barras internas de geração do sistema [10], a  $i$ -ésima barra de geração conectada ao sistema de transmissão pode ser genericamente representada por [10,32] :

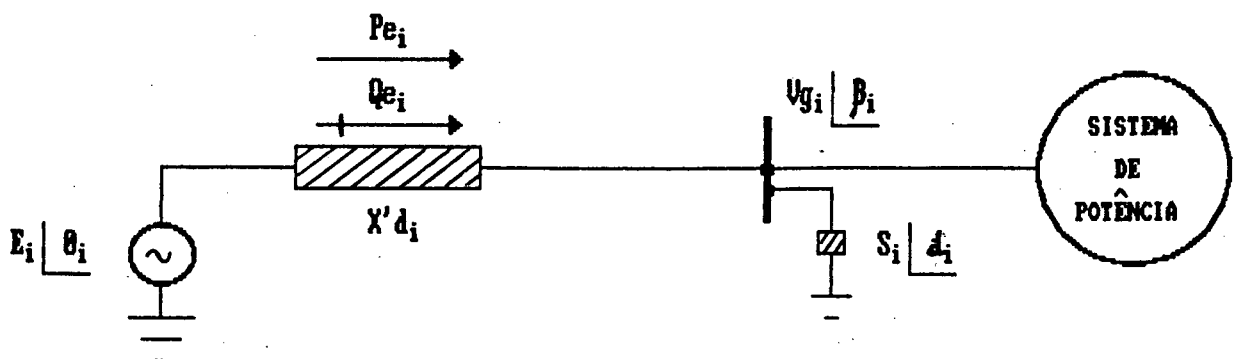


Figura 1 - Representação da  $i$ -ésima barra de geração do sistema

onde :

$$\begin{aligned} v_{g_i} e^{j\beta_i} &= \text{tensão terminal da } i\text{-ésima barra de geração} \\ &= e_i + j f_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_i e^{j\theta_i} &= \text{tensão interna da } i\text{-ésima máquina síncrona} \\ &= A_i + j B_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_i e^{j\alpha_i} &= \text{carga conectada à } i\text{-ésima barra de geração} \\ &= P_i + j Q_i. \end{aligned}$$

As variáveis  $e_i$  e  $f_i$  são, respectivamente, as partes real e imaginária da tensão da  $i$ -ésima barra externa de geração, sendo as variáveis  $A_i$  e  $B_i$  as partes real e imaginária da tensão interna de geração da  $i$ -ésima máquina síncrona, respectivamente. A carga conectada à barra externa de geração, por sua vez, é decomposta nas parcelas real  $P_i$  e imaginária  $Q_i$ .

Na Figura 1, observa-se que as variáveis angulares estão referidas ao centro de ângulos. Portanto, a potência elétrica ativa fornecida pela máquina síncrona pode ser expressa por [10,16,32] :

$$P_{e_i} = - C_i \cdot f_i + D_i \cdot e_i \quad (2.2.1.7)$$

onde :

$$C_i = E_i \cos \theta_i / X'd_i \quad (2.2.1.8)$$

$$D_i = E_i \sin \theta_i / X'd_i \quad (2.2.1.9)$$

$X'd_i$  = reatância transitória de eixo direto da  $i$ -ésima máquina síncrona.

De maneira similar, a potência elétrica reativa absorvida ou entregue pela  $i$ -ésima máquina síncrona pode ser expressa por [10] :

$$Q_{e_i} = E_i^2 / X'd_i - C_i \cdot e_i - D_i \cdot f_i \quad (2.2.1.10)$$



Considerando-se as cargas modeladas como impedâncias constantes, as parcelas de tensão externa  $e_i$  e  $f_i$ , pelo fato de variarem durante o período transitório afetando a potência elétrica entregue ao sistema pela máquina ao longo do mesmo, podem ser determinadas a partir da solução de um sistema de equações lineares expresso por [10,16,32] :

$$\begin{bmatrix} v_g \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gl} \\ Z_{lg} & Z_{ll} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2.1.11)$$

sendo :

$v_{l_i}$  = tensão nas barras do sistema, excetuadas as barras internas e externas de geração

$i_{g_i}$  = corrente da  $i$ -ésima máquina síncrona

$$= D_i - j C_i$$

$m$  = número total de barras do sistema

onde :

$$v_g = [ v_{g1} \ v_{g2} \ \dots \ v_{gn} ]^T$$

$$v_l = [ v_{l,n+1} \ v_{l,n+2} \ \dots \ v_{l,m} ]^T$$

$$i_g = [ i_{g1} \ i_{g2} \ \dots \ i_{gn} ]^T$$

(g),(l) = subscritos que representam os índices relativos às barras de geração e de carga, respectivamente.

As partes real e imaginária da tensão das barras externas de geração são expressas por [10,16,32] :

$$e_i = \sum_{k \in N} ( R_{ik} \cdot D_k + X_{ik} \cdot C_k ) \quad (2.2.1.12)$$

$$f_i = \sum_{k \in N} ( - R_{ik} \cdot C_k + X_{ik} \cdot D_k ) \quad (2.2.1.13)$$

onde :

$R, X$  = partes real e imaginária, respectivamente, da submatriz

denominada matriz de impedância nodal  $Z_{gg}$  do sistema de equações (2.2.1.11).

As expressões analíticas das partes real e imaginária da tensão interna das máquinas síncronas são expressas por [01] :

$$A_i = v_{g_i} + ( Qe_i \cdot X'd_i ) / v_{g_i} \quad (2.2.1.14)$$

$$B_i = ( Pe_i \cdot X'd_i ) / v_{g_i} \quad (2.2.1.15)$$

Em resumo, os modelos matemáticos que descrevem o comportamento do sistema durante o período transitório são representados pelo conjunto de equações abaixo relacionado :

\* Equações Diferenciais :

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i &= \omega_i \\ M_i \dot{\omega}_i &= Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{MT} PCA - d_i \omega_i \end{aligned}$$

\* Equações Algébricas :

$$\begin{aligned} Pe_i &= -C_i \cdot f_i + D_i \cdot e_i \\ Qe_i &= E_i^2 / X'd_i - C_i \cdot e_i - D_i \cdot f_i \\ C_i &= E_i \cdot \cos \theta_i / X'd_i \\ D_i &= E_i \cdot \sin \theta_i / X'd_i \\ PCA &= \sum_{j \in N} (Pm_j - Pe_j) \\ e_i &= \sum_{k \in N} ( R_{ik} \cdot D_k + X_{ik} \cdot C_k ) \\ f_i &= \sum_{k \in N} ( -R_{ik} \cdot C_k + X_{ik} \cdot D_k ) \\ A_i &= v_{g_i} + ( Qe_i \cdot X'd_i ) / v_{g_i} \\ B_i &= Pe_i \cdot X'd_i / v_{g_i} \quad , \quad i \in N . \end{aligned}$$

### 2.2.2. Análise da Estabilidade Transitória pelo Método Direto de Liapunov

Os sistemas elétricos de potência apresentam um comportamento não-linear que, para estudos de estabilidade transitória, pode ser descrito por um modelo matemático constituído por sistemas de equações diferenciais ordinárias não-lineares, invariantes no tempo e autónomos. Na ausência de uma metodologia de solução analítica das equações que regem o comportamento do sistema durante o período transitório, as equações diferenciais associadas (2.2.1.3) são usualmente resolvidas por simulação numérica, sendo os estudos de estabilidade transitória baseados na análise da evolução da posição angular de cada máquina ao longo do tempo.

Conforme anteriormente mencionado, o Método Direto de Liapunov constitui-se numa alternativa eficiente de análise considerando-se o tempo de cálculo e a qualidade das soluções apresentadas, quando se emprega o modelo clássico.

Desta forma, apresenta-se a seguir os conceitos básicos e definições do Método Direto de Liapunov, necessários à compreensão deste trabalho.

O sistema (2.2.1.3) pode ser descrito por equações da forma [32]

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.2.2.1)$$

onde :

$f(x)$  = função vetorial composta por componentes que representam não-linearidades que satisfazem as condições de Lipschitz,

no sentido de assegurar a existência, unicidade e prolongabilidade das soluções até  $+\infty$ .

O sistema (2.2.2.1) representa um sistema livre e  $x^e$  é denominado estado de equilíbrio se, e somente se,  $f(x^e) = 0$ . No caso de sistemas autônomos, pode-se definir o ponto de equilíbrio de (2.2.2.1) como sendo a origem do sistema.

#### Definição 1. Estado Inicial [32]

Defini-se  $x = x_0$  como sendo o estado inicial ou condição inicial para a evolução de uma solução de (2.2.2.1).

#### Definição 2. Estabilidade no Sentido de Liapunov [06]

O estado  $y = 0$  é estável no sentido de Liapunov se, para todo  $\varepsilon > 0$ , existe  $\xi(\varepsilon) > 0$ , tal que

$$\| y_0 \| \leq \xi(\varepsilon) \rightarrow \| y(t) \| \leq \varepsilon, \quad t \geq 0$$

onde :

$$\| \cdot \| = \text{alguma norma no espaço } \mathbb{R}^n.$$

#### Definição 3. Estabilidade Assintótica [06]

O estado  $y = 0$  é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável se  $y = 0$  for estável no sentido de Liapunov e se

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \| y(t) \| = 0.$$

#### Definição 4. Instabilidade [32]

O estado  $y^e$  é um ponto de equilíbrio instável de (2.2.2.1) se, dado um número real  $\varepsilon > 0$  qualquer, existe  $\xi(\varepsilon) > 0$ , tal que

$$\| y_0 \| \leq \xi(\varepsilon) \rightarrow \| y(t) \| > \varepsilon.$$

Definição 5. Função Definida Positiva [06]

Uma função contínua  $W : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é uma função definida positiva se, e somente se,

- .  $W(0) = 0$
- .  $W(y) > 0$  , para  $y \neq 0$
- .  $W(y) \rightarrow \infty$  quando  $y \rightarrow \infty$  , uniformemente em  $y$  .

Definição 6. Função Semi-Definida Positiva [06]

Uma função contínua  $W : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é uma função semi-definida positiva se, e somente se,

- .  $W(0) = 0$
- .  $W(y) \geq 0$  , para todo  $y \neq 0$  .

Definição 7. Função Definida Negativa [06]

Uma função contínua  $W : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é uma função definida negativa se, e somente se,

- .  $W(0) = 0$
- .  $W(y) \leq 0$  , para  $y \neq 0$
- .  $W(y) \rightarrow -\infty$  quando  $y \rightarrow \infty$  , uniformemente em  $y$  .

Definição 8. Função Semi-Definida Negativa [06]

Uma função contínua  $W : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é uma função semi-definida negativa se, e somente se,

- .  $W(0) = 0$
- .  $W(y) \leq 0$  , para todo  $y \neq 0$ .

Os teoremas a seguir representam condições suficientes para os estudos de estabilidade de sistemas não-lineares, constituindo-se nos fundamentos básicos da teoria de Liapunov.

Teorema 1. Se, para a origem do sistema (2.2.2.1), existir uma função  $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , definida em  $D \subset \mathbb{R}^n$ , tal que

- .  $V(y)$  é definida positiva em  $D$
- .  $V(y)$  possui todas as derivadas  $\partial V(y)/\partial y_i$  contínuas
- .  $\dot{V}(y) = \langle \partial V(y)/\partial y, f(y) \rangle$  é semi-definida negativa em  $D$  ,

então,  $y = 0$  de (2.2.2.1) é estável no sentido de Liapunov (conforme a Definição 2), onde :

$y_i$  =  $i$ -ésima componente do vetor  $y$

$\langle a, b \rangle$  = produto escalar de  $a$  e  $b$ ,  $a, b \in \mathbb{R}^n$

$$= \sum_{i=1}^n a_i b_i .$$

Teorema 2. Se, para a origem do sistema (2.2.2.1), existir uma função  $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , definida em  $D \subset \mathbb{R}^n$ , tal que

- .  $V(y)$  é definida positiva em  $D$
- .  $V(y)$  possui todas as derivadas  $\partial V(y)/\partial y_i$  contínuas
- .  $\dot{V}(y) = \langle \partial V(y)/\partial y, f(y) \rangle$  é definida negativa em  $D$  ,

então,  $y = 0$  de (2.2.2.1) é assintoticamente estável (Definição 3).

As funções que satisfazem as condições impostas pelos Teoremas 1 ou 2 são denominadas Funções de Liapunov, constituindo-se numa generalização da função energia, que será comentada a seguir.

Devido à natureza não-linear intrínseca aos sistemas elétricos de potência, a qual implica na existência de vários pontos de equilíbrio, nem todas as condições iniciais  $y_0$  determinam soluções  $y(t)$  estáveis segundo as Definições 2 ou 3. Surge, deste modo, a necessidade de se definir Domínio de Estabilidade.

Definição 9. Domínio de Estabilidade [10,15]

É um subconjunto do  $\mathbb{R}^n$ , aberto e conexo, que contém no seu interior o ponto de equilíbrio e um conjunto de condições iniciais que definem soluções estáveis.

Em decorrência da Definição 9, a análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência pelo Método Direto de Liapunov consiste na geração de uma função de Liapunov e, a partir desta, na determinação de um domínio de estabilidade. Então, para uma condição inicial qualquer  $y_0$ , calcula-se o valor da função de Liapunov neste ponto  $V(y_0)$  e, em seguida, conclui-se sobre a estabilidade ou instabilidade transitória, mediante o seguinte critério :

- . Se  $V(y_0) < V(y^*)$  , conclui-se pela estabilidade do ponto de equilíbrio e
- . Se  $V(y_0) \geq V(y^*)$  , nada se pode afirmar tendo em vista que os teoremas dão apenas condições suficientes de estabilidade,

onde :

$V(y^*)$  pode ser determinado através da solução de um problema de programação não-linear

$$\text{Min } V(y) \text{ sujeito a } \dot{V}(y) = 0 \quad (2.2.2.2)$$

onde :

$$\dot{V}(y) = \langle \partial V(y)/\partial y, f(y) \rangle$$

$y^*$  = é a solução do problema (2.2.2.2). Esta solução especifica um domínio de estabilidade como :

$$\mathbb{D} = \{ y / V(y) < V(y^*) \} . \quad (2.2.2.3)$$

O modelo clássico sem a consideração dos reguladores e amortecimentos, dado pela equação (2.2.1.3), caracteriza-se como um sistema conservativo. Desta forma, a função energia, originada da

generalização do método da primeira integral e quando empregada como função de Liapunov, proporciona resultados considerados satisfatórios na análise de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência, conforme observa-se na maioria dos trabalhos citados na literatura [10,16,19,32].

A energia total associada ao sistema (2.2.1.3) é composta pela soma das parcelas de energia cinética e potencial [10,16,19,32], ou seja :

$$E(\theta, \omega) = E_c(\omega) + E_p(\theta) \quad (2.2.2.4)$$

onde :

$$E_c(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{i \in N} M_i \omega_i^2 \quad (2.2.2.5)$$

$$E_p(\theta) = - \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} g_i(\theta) d\theta_i \quad (2.2.2.6)$$

$$g_i(\theta) = P_{m_i} - P_{e_i} - \frac{M_i}{MT} PCA \quad (2.2.2.7)$$

(p) = superscrito denotando o estado de equilíbrio pós-defeito.

Em vista das propriedades das coordenadas do centro de angulos contidas na equação (2.2.1.6), a função energia pode ser expressa por [32] :

$$E(\theta, \omega) = E_c(\omega) - \sum_{i \in N} P_{m_i} (\theta_i - \theta_i^p) + \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} P_{e_i} d\theta_i \quad (2.2.2.8)$$

Nota-se, pela equação acima, que a energia total não está diretamente associada a PCA, já que

$$\sum_{i \in N} \frac{M_i}{MT} PCA \omega_i = \frac{PCA}{MT} \sum_{i \in N} M_i \omega_i = 0 \quad (2.2.2.9)$$

Destaca-se ainda que a função energia, a qual é expressa pela



equação (2.2.2.8), contém um termo na forma integral que é dependente do caminho de integração (trajetória de estados do sistema), originado pela inclusão das condutâncias de transferência no modelo (2.2.1.3).

Dentre as várias alternativas propostas na literatura [02,12,15, 23,31,39], a solução a ser adotada neste trabalho para esse problema consiste na avaliação da integral à medida que se conhece a evolução dos ângulos e velocidades das máquinas [16] obtida por expansão em séries de Taylor do segundo membro de (2.2.1.3). Desta forma, sendo conhecido o caminho de integração entre dois pontos quaisquer sobre a trajetória do sistema, a integral pode ser determinada.

A função energia (2.2.2.4), avaliada da maneira acima proposta, é uma função de Liapunov na vizinhança do ponto de equilíbrio estável, segundo a Definição 2 e o Teorema 1 [15].

### 2.2.3. Método SLEP

Apresenta-se a seguir a concepção básica do método SLEP, o qual considera o modelo clássico com referência ao centro de ângulos e com preservação da topologia original da rede (sem redução as barras internas).

A Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP), conforme definida em [32], representa os pontos de máximos direcionais da energia potencial que circundam o ponto de equilíbrio estável,

definindo uma superfície que pode ser usada como o limite de separação entre as regiões de estabilidade e instabilidade para uma determinada trajetória de falta. A interpretação geométrica deste fenômeno pode ser feita imaginando-se a SLEP como sendo o conjunto de pontos que constitui o divisor de águas que circunda o ponto de equilíbrio estável [32].

Conceitualmente, a estabilidade para uma certa perturbação pode ser decidida pela análise da trajetória pós-defeito que começa no estado do sistema em que cessa a perturbação. Se, para todo  $t > 0$ , a trajetória pós-defeito começa no interior da SLEP e não cruza a SLEP, então o estado do sistema é considerado estável. No interior da SLEP, a derivada direcional  $D(\theta)$  se mantém sempre positiva para trajetórias que permanecem no interior da SLEP [03,10,16,32].

A derivada direcional da energia potencial é expressa por [10, 16,32] :

$$D(\theta) = - \frac{1}{\|\theta - \theta^P\|_e} \langle g(\theta), (\theta - \theta^P) \rangle \quad (2.2.3.1)$$

onde :

$$g(\theta) = [ g_1(\theta) \ g_2(\theta) \ \dots \ g_n(\theta) ]^T$$

$\theta$  = vetor posição angular das máquinas síncronas referida ao centro de ângulos

$\theta^P$  = vetor posição angular das máquinas síncronas referida ao centro de ângulos e relativa ao estado de equilíbrio pós-falta

$$\begin{aligned} \|a\|_e &= \text{Norma Euclidiana de } a \in \mathbb{R}^n \\ &= \left( \sum_{i=1}^n |a_i|^2 \right)^{1/2} . \end{aligned}$$

Definição 10. Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) [10,16]

São todos os pontos  $\theta \in \mathbb{R}^n$  correspondentes aos zeros da derivada direcional, excetuando o ponto de equilíbrio estável do sistema, que primeiro são alcançados quando se percorre uma direção radial a partir da origem.

Definição 11. Trajetória do Sistema [32]

É o conjunto de pontos dado por

$$\mathbb{T} = \left\{ [\theta(t), \omega(t)]^T / t \geq 0, \theta(t) = [\theta_1(t) \theta_2(t) \dots \theta_n(t)]^T, \right. \\ \left. \omega(t) = [\omega_1(t) \omega_2(t) \dots \omega_n(t)]^T \right\} .$$

Decorrente do fato da função energia potencial ser definida positiva na vizinhança do equilíbrio estável pós-falta, tem-se que os estados do sistema sobre uma trajetória apresenta [32] :

- .  $\mathcal{D}(\theta) > 0$  → ponto da trajetória "interior" a SLEP
- .  $\mathcal{D}(\theta) = 0$  → ponto da trajetória cruzando a SLEP
- .  $\mathcal{D}(\theta) < 0$  → ponto da trajetória "exterior" a SLEP .

A monitoração da função  $\mathcal{D}(\theta)$  ao longo da trajetória do sistema sob defeito e pós-defeito, pode ser utilizada como um meio de análise de estabilidade transitória através da verificação do cruzamento ou não da SLEP, onde a derivada direcional troca de sinal [10,16,32].

Portanto, o método SLEP consiste na busca de um ponto sobre a trajetória sob defeito, tal que a evolução da trajetória pós-defeito, que começa neste ponto, tenha máxima aproximação à SLEP. Este ponto pode ser encontrado tomando-se duas estimativas de energia : uma denominada energia crítica pessimista e a outra energia crítica

otimista, entendendo-se por energia crítica pessimista (otimista), a energia total do sistema (2.2.1.3) calculada em um ponto sobre a trajetória durante o defeito que determina uma trajetória pós-defeito estável (instável). Sendo o sistema de potência um sistema tomado sem amortecimento, ele é conservativo e, portanto, a energia total mantém-se constante durante a evolução pós-defeito.

Inicialmente, arbitra-se a energia pessimista igual a zero e a otimista como sendo idêntica à energia potencial do sistema com a falta mantida, calculada no ponto de cruzamento desta trajetória com a SLEP e tomando-se energia crítica igual a zero. Usando-se, como condição inicial para o sistema pós-defeito, o ponto sobre a trajetória sob defeito onde a energia total é igual à energia crítica inicial, simula-se as equações do sistema pós-defeito e verifica-se se, dentro de um tempo razoável, a trajetória pós-defeito cruza a SLEP.

Se existe o cruzamento, então diminui-se o tempo associado à condição inicial mencionado acima e simula-se novamente o sistema pós-defeito. Verifica-se o cruzamento como antes. Se não cruza a SLEP, então aumenta-se o tempo associado ao estado onde a energia total era igual à energia crítica e simula-se novamente.

O processo acima pode ser repetido até que se obtenha dois tempos suficientemente próximos. Neste caso, a média entre os dois é usada como o tempo crítico de eliminação do defeito.

Tem sido tomado como período de observação das trajetórias pós-

defeito um tempo em torno de 2 s (tempo usualmente adotado em simulações de estabilidade transitória de primeira oscilação). Estas trajetórias são determinadas via aproximações por séries de Taylor, com seus coeficientes atualizados com frequência que depende da precisão desejada, ordem das aproximações e do tipo de trajetória. Estes coeficientes são calculados de forma recursiva, representando um tempo computacional inferior à integração numérica das equações diferenciais do sistema (2.2.1.3), e conduzem à soluções com precisão comparáveis aquelas obtidas por simulação numérica [10,16,17,32].

O algoritmo computacional completo do método SLEP pode ser encontrado no Apêndice A da referência [32].

#### 2.2.4. Margem de Segurança Dinâmica

A margem de segurança dinâmica associada à  $r$ -ésima contingência, conforme definida na literatura, pode ser interpretada como sendo uma "medida" da distância em relação à condição de instabilidade do sistema, constituindo-se numa indicação quantitativa do grau de estabilidade/instabilidade transitória do sistema e pode ser calculada por [16,23] :

$$M_r = (E_{crit_r} - E_{e_r}) / E_{crit_r} \quad (2.2.4.1)$$

onde :

$r$  = índice da contingência sob análise

$E_{crit_r}$  = energia crítica do sistema para a  $r$ -ésima contingência

$E_{e_r}$  = energia do sistema para a  $r$ -ésima contingência, avaliada no instante de eliminação do defeito para faltas do tipo

curto-circuito trifásico ou monofásico seguido de perda de equipamento .

A energia crítica, bem como o tempo crítico  $t_{crit}$ , são determinados através do método SLEP.

Desta forma, a estabilidade do sistema para a  $r$ -ésima contingência será avaliada, empregando-se o conceito de margem de segurança, mediante o critério a seguir [16,32] :

- . Se  $M_r > 0$  → o sistema associado à  $r$ -ésima contingência é dito estável e
- . Se  $M_r \leq 0$  → o sistema associado à  $r$ -ésima contingência é dito instável .

Considerando-se um conjunto de contingências estabelecido a priori, a margem de segurança permite destacar aquelas mais severas, de acordo com a ordenação das mesmas por ordem crescente de seus valores, constituindo-se, portanto, num índice de desempenho relativo aos transitórios eletromecânicos.

Em função do que será discutido no texto a seguir, é conveniente apresentar-se as definições seguintes.

Definição 12. Margem de Segurança do Sistema [22]

É definida como sendo a menor entre as margens associadas a cada contingência, isto é,

$$M = \min_r \{ M_r \} \quad . \quad (2.2.4.2)$$

### Definição 13. Contingência em Sobrecarga [32]

É definida como sendo a contingência em que o sistema apresenta margem de segurança inferior a um valor mínimo permissível ( $M_{\min}$ ).

### 2.3. Melhoria de Segurança Dinâmica

A elevada dimensão física dos atuais sistemas elétricos de potência, bem como seu comportamento essencialmente não-linear, dificultam a análise de segurança frente a possíveis perturbações e impossibilita soluções analíticas.

Assim, tem-se feito uso de simulação numérica das equações diferenciais do sistema e de uma lista de contingências pré-estabelecida para se analisar o desempenho do sistema. Se constatada alguma violação na sua segurança, faz-se necessário efetuar alterações no ponto de operação do sistema de maneira a eliminar ou, ao menos, atenuar os efeitos decorrentes de tais perturbações. Tal atividade é definida como Controle ou Melhoria de Segurança Dinâmica.

#### 2.3.1. Apresentação do Problema de Melhoria de Segurança Dinâmica

O problema de Melhoria de Segurança Dinâmica, considerando um critério de margem de segurança, pode ser enunciado do seguinte modo [32] :

Problema : Supondo-se que, para uma lista de  $S$  contingências sob análise, encontram-se  $R$  contingências para as quais o sistema é

considerado inseguro, isto é,  $M_r \leq M_{\min}$ ,  $r=1,2,\dots,R$ ,  $R \leq S$ . Então, para conduzi-lo ao estado dito seguro, deve-se impor ações de controle tal que se obtenha

$$M \geq M_{\min} \quad (2.3.1.1)$$

onde :

$M$  = margem mínima do sistema (conforme Definição 12)

$M_{\min}$  = margem de segurança mínima permissível ( $\geq 0$ ).

Tais ações de controle a serem efetuadas, devem ocasionar incrementos  $\Delta M_r$  nas margens de segurança, de modo que as seguintes relações devem ser observadas [32] :

$$M_r^{\circ} + \Delta M_r \geq M_{\min}, \quad r = 1,2,\dots,R. \quad (2.3.1.2)$$

onde :

$M_r^{\circ}$  = margem de segurança do sistema para a  $r$ -ésima contingência.

Da maneira acima exposta, resolver o problema de Melhoria de Segurança Dinâmica consiste em se determinar que ações de controle devem ser efetuadas, onde aplicá-las e em que intensidade, de modo que modifiquem de  $\Delta M_r$  as margens de segurança  $M_r^{\circ}$ ,  $r = 1,2,\dots,R$ .

Para a solução do problema de Melhoria de Segurança Dinâmica, são elementos determinantes no sucesso de busca de ações de controle os seguintes pontos :

- lista das contingências a serem analisadas
- método empregado na análise da estabilidade transitória
- critério que mede o grau de estabilidade do sistema
- ações de controle de Melhoria de Segurança Dinâmica, dentre os quais pode-se usar :



- . redespacho da geração
- . modificação do perfil de tensões nodais
- . modificação da topologia da rede
- . alívio de carga (corte de geração).

Neste trabalho, dar-se-á atenção à modificação do perfil de tensão nodal como ação de controle na Melhoria de Segurança Dinâmica.

### 2.3.2. Estado da Arte em Melhoria de Segurança Dinâmica

Apresentam-se, nesta seção, os principais métodos que tratam da Melhoria de Segurança Dinâmica, os quais surgiram recentemente, sendo ainda reduzido o número de referências disponíveis na literatura especializada.

Pelo fato de alguns métodos a serem analisados não terem denominações individuais, esses serão apresentados em ordem cronológica de publicação e atribuídos aos autores.

#### \* Método Fonseca et al. (EEL-UFSC) [20]

##### Características :

- A análise de estabilidade transitória é efetuada através do Método Direto de Liapunov, sendo os domínios de estabilidade calculados pelo método do politopo [09];
- A margem de segurança adotada é semelhante a da equação (2.2.4.1), porém não é normalizada;
- Considera contingências do tipo saída de linhas de transmissão;

- Desenvolve um modelo incremental com análise de sensibilidade, representando o montante necessário de correção para a obtenção de uma nova margem, dentro de níveis considerados seguros. Este modelo incremental é descrito em função de acréscimos no vetor de injeção de potência ativa nodal, cuja solução é encontrada por programação linear minimizando-se o desvio em torno do ponto de operação inicial.

Críticas :

- Os resultados da análise de estabilidade transitória tornam-se muito conservativos à medida em que se aumenta a dimensão do sistema;
- Considera apenas contingências do tipo saída de linhas de transmissão ou transformador, não abrangendo curto-circuito nas divulgações feitas, embora possa incluí-lo.

\* Método Mesegt (EEL-UFSC) [22]

Características :

- A Melhoria de Segurança Dinâmica é efetuada procurando-se aumentar o domínio de estabilidade, através do "aumento" da superfície de energia potencial, na qual está contido o domínio de estabilidade.

Neste sentido, reduz-se o ângulo entre uma máquina e a referência ou entre duas máquinas, cujo(s) índice(s) é(são) indicado(s) pela face onde ocorreu a tangência, atuando-se nas gerações correspondentes. Este(s) índice(s) orienta(m) onde deve(m) ser efetuado(s) a(s) alteração(ões) na potência mecânica da(s) máquina(s). De modo a manter-se o balanço de potência, a parcela de geração retirada deverá ser alocada em outra(s)

unidade(s) geradora(s);

- Considera contingências do tipo saída de linhas de transmissão e/ou transformadores.

Críticas :

As mesmas apresentadas no método anterior.

\* Método Chandrashekar & Hill [07,08]

Características :

- Consiste num método de redespacho em segurança baseado nas premissas de análise de estabilidade transitória pelo modelo proposto por Bergen & Hill [04];
- Preservando-se a topologia original da rede, desenvolve fatores de distribuição que podem orientar a obtenção da melhoria da estabilidade transitória por meio da variação de potências ativas, tensões nodais e impedância de linhas de transmissão;
- A análise consiste em se obter um novo ponto de equilíbrio, tal que o corte vulnerável no grafo do sistema seja menos crítico, aumentando-se, desta forma, o domínio de estabilidade e, conseqüentemente, a margem de segurança.

Críticas :

- A análise de estabilidade transitória é baseada em procedimentos que originam resultados conservativos e de difícil obtenção;
- Sua principal vantagem consiste em manter a topologia original da rede sem redução às barras internas e em considerar contingências do tipo curto-circuito trifásico.

\* Método Mesegf (EEL-UFSC) [05]

Características :

- Extensão do método Fonseca et al., porém com a inclusão de restrições relativas à várias contingências, sendo o problema de programação linear associado tratado em sua formulação dual;
- A solução do problema de programação linear fornece um vetor de acréscimos ao vetor de geração original. Não havendo solução viável, são incluídas parcelas negativas associadas ao corte de carga necessário para a existência da solução;
- As contingências consideradas no modelo são do tipo saída de linhas de transmissão e a análise de estabilidade transitória baseia-se no método do politopo.

Críticas :

As mesmas apresentadas no método Fonseca et al..

\* Método El-Kady et al. [13]

Características :

- Considera contingências do tipo curto-circuito trifásico;
- A Correção de Segurança Dinâmica é formulada através de uma margem de segurança não-normalizada, sendo expressa em função do "interface-flow" (intercâmbio entre áreas do sistema);
- Objetiva a determinação do máximo "interface-flow", referente à margem de segurança igual a zero, ou seja, a determinação do "interface-flow" crítico. Tal objetivo é alcançado com a variação da geração do sistema em torno do estado nominal, através do emprego de fatores de distribuição que são gerados pela análise de sensibilidade. O "interface-flow" é monitorado durante a operação do sistema e comparado com o máximo

"interface-flow", dando a indicação de quão distante se encontra a operação do seu estado crítico.

Críticas :

- Sua dificuldade reside na necessidade do cálculo do máximo "interface-flow", o que deve ser feito para diversos pontos da rede e para cada contingência sob análise, exigindo um grande esforço computacional.

\* Método Xue et al. [45]

Características :

- Através do cálculo de fatores de sensibilidade de segunda ordem, considera o critério estendido de igualdade de áreas do sistema equivalente, formulando-se, desta maneira, a Melhoria de Segurança Dinâmica;
- O método baseia-se em um modelo de sistema equivalente composto por máquina síncrona x barra infinita, ou seja, o conjunto de máquinas críticas é representado por uma máquina equivalente, enquanto que as demais máquinas representam um equivalente barra infinita;
- Apresenta um algoritmo para seleção das máquinas críticas.

Críticas :

- A qualidade das soluções encontradas depende, entre outros fatores, da identificação exata do grupo de máquinas críticas, o que, a priori, só é possível através de simulações considerando a situação pós-efeito;
- Mesmo admitindo o prévio conhecimento das máquinas que perdem o sincronismo, poder-se-á estar diante de situações contraditórias, visto que as máquinas críticas, para o cálculo

de um domínio de estabilidade, não são necessariamente as mesmas máquinas associadas às trajetórias que começam sobre as trajetórias de defeito no instante da eliminação do defeito, quando este é maior que o tempo crítico.

Esta mesma metodologia é também abordada nas referências Xue & Pavella [44]) e Lemmon et al. [30], valendo as mesmas observações.

\* Método Mesegm (EEL-UFSC) [18]

Características :

- Constitui-se numa extensão do método Fonseca et al., admitindo-se porém contingências tipo curto-circuito trifásico;
- A análise de estabilidade transitória é efetuada através do Método Direto de Liapunov com domínios de estabilidade calculados pelo método do politopo.

Críticas :

- Apesar do método do politopo proporcionar soluções conservativas se comparado com metodologias mais recentes, apresenta resultados que são considerados satisfatórios;
- O método do politopo caracteriza-se pela facilidade do cálculo da sensibilidade e tempo computacional relativamente reduzido para indicação das alterações na geração do sistema visando a melhoria da segurança.

\* Método Vittal et al. [43]

Características :

- A função de Liapunov tipo energia é avaliada supondo-se um caminho de integração linear, de acordo com a proposição de

Athay et al. [02];

- A energia cinética é baseada em um equivalente máquina síncrona versus barra infinita;
- Na determinação da energia crítica são considerados os pontos de equilíbrio instáveis;
- A determinação da sensibilidade da margem de segurança não normalizada é efetuado considerando-se parâmetros associados a um conjunto de máquinas predefinidas que deverão participar da ação de controle.

Críticas :

- A obtenção da sensibilidade com relação a cada parâmetro implica na inversão de uma matriz de ordem  $n$ , o que se torna oneroso computacionalmente caso se deseje utilizar o redespacho de geração considerando todas as máquinas do sistema e um conjunto de várias contingências;
- A determinação da energia crítica através dos pontos de equilíbrio instáveis de interesse apresenta dificuldades em sua obtenção [03,10,16,32,38].

\* Método Minussi (EEL-UFSC) [32]

Características :

- Constitui-se numa extensão do método Fonseca et al., admitindo contingências tipo curto-circuito trifásico;
- A análise de estabilidade transitória é efetuada através do Método Direto de Liapunov empregando a metodologia SLEP;
- A Melhoria de Segurança Dinâmica é efetuada empregando-se um modelo de sensibilidade de primeira ordem da margem de segurança

em relação às posições angulares das máquinas síncronas;

- Adotando ações de controle tipo redespacho de geração, procura melhorar a margem de segurança minimizando o desvio do ponto de operação do sistema.

#### Críticas :

- Apesar de propiciar resultados satisfatórios na Melhoria de Segurança Dinâmica através do redespacho de geração, apresenta a desvantagem de se ater a uma ação de controle que nem sempre pode ser empregada.

#### 2.4. Conclusão

Neste capítulo, foi apresentado o modelo matemático do sistema (modelo clássico), cujas posições angulares estão referidas ao centro de ângulos. Neste modelo, as interações entre as máquinas síncronas e a rede são consideradas com preservação da topologia da rede, ou seja, sem redução às barras internas de geração [16].

Visando apresentar a função energia como uma função de Liapunov, foram citados alguns conceitos e definições que formam a base do Método Direto de Liapunov. O uso de domínios de estabilidade permite a definição de margens de segurança, úteis na análise de estabilidade transitória. Neste sentido, foi apresentado sucintamente o método SLEP para o cálculo de energias, tempos críticos e margens de segurança dinâmica. Com o emprego dessas margens, pode-se definir a formulação do problema de Melhoria de Segurança Dinâmica.

Por último, foi feita uma análise crítica com relação às principais técnicas de Melhoria de Segurança Dinâmica citadas na literatura. Assim, nota-se a existência de três grupos de



metodologias : o primeiro grupo, composto pelas referências [05,18, 20,22,32,35], com desenvolvimentos baseados no método do politopo [09], cuja principal limitação refere-se à inerente conservatividade dos resultados dos domínios de estabilidade calculados, sendo entretanto garantida sua solução; no segundo grupo, composto pelas referências [07,08], com desenvolvimentos baseados no modelo com preservação da topologia da rede [04], os quais também apresentam domínios de estabilidade conservativos; o terceiro grupo, composto pelas referências [30,44,45], com desenvolvimentos baseados no modelo equivalente a máquina x barra infinita, cujos resultados são ora otimistas, ora pessimistas. Isoladamente, citam-se as referências [13,43].

Nota-se, portanto, que as soluções para o problema de Melhoria de Segurança Dinâmica citadas pela literatura dependem da determinação de domínios de estabilidade e em várias propostas apresentam dificuldades devido à desconsideração das trajetórias pós-defeito.

Em função disto, no próximo capítulo, será proposta uma metodologia para a Melhoria de Segurança Dinâmica, que visa explorar resultados recentes em relação à obtenção de margens de segurança dinâmica, baseada no método iterativo SLEP.

## CAPÍTULO 3

### FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE MELHORIA DE SEGURANÇA DINÂMICA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

#### 3.1. Introdução

A Melhoria de Segurança Dinâmica, conforme mencionado no capítulo anterior, é definida como sendo o conjunto de ações de controle que atuam no sentido de atenuar os transitórios das perturbações que normalmente ocorrem nos sistemas elétricos de potência.

Neste capítulo, são tecidas algumas considerações sobre estas ações, em particular, a influência da tensão na estabilidade transitória dos sistemas elétricos de potência e como a alteração da tensão de excitação das máquinas síncronas pode influir na Melhoria de Segurança Dinâmica.

Em seguida, é apresentado o desenvolvimento das relações matemáticas entre a margem de segurança e o vetor tensão interna pré-falta. A partir destas relações pode-se, como será visto no próximo capítulo, desenvolver estratégias de mudança do perfil de tensão do sistema empregando recursos, como a alteração da tensão interna das máquinas síncronas, para a Melhoria de Segurança Dinâmica.

## 3.2. Influência da Tensão na Estabilidade Transitória

### 3.2.1. Considerações Preliminares

A equação (2.2.1.7) expressa a potência elétrica entregue ao sistema pela  $i$ -ésima máquina síncrona em função de parâmetros da própria máquina e de grandezas do sistema externo acoplado a essa máquina, entre os quais :

- . tensão interna da máquina (  $E_i$  );
- . reatância transitória de eixo direto da máquina (  $X'd_i$  );
- . impedância externa equivalente vista pela máquina (  $R_{ik}$  e  $X_{ik}$  );
- . posição angular da máquina referida ao centro de ângulos (  $\theta_i$  );
- . tensão da barra externa de geração (  $e_i$  e  $f_i$  ).

Desta forma, sendo a energia potencial do sistema expressa pela equação (2.2.2.6), composta por parcelas que consideram a evolução da potência elétrica entregue pela máquina durante o período transitório, a alteração da potência elétrica pré-falta para determinados valores, mediante mudança em algum dos parâmetros acima relacionados, pode se constituir numa ação eficiente de Melhoria de Segurança Dinâmica.

Sendo os despachos de usinas adotados na operação dos sistemas elétricos de potência como decorrentes da otimização global dos recursos elétricos e energéticos disponíveis em determinada situação hidrológica, deve-se procurar alterá-los o mínimo possível com o intuito de se corrigir a segurança dinâmica do sistema, se ainda estiverem disponíveis recursos alternativos para a Melhoria de

## Segurança Dinâmica.

Neste sentido, a alteração do nível de excitação da máquina síncrona (tensão interna  $E_i$ ) não ocasiona mudanças significativas no despacho a priori estabelecido para as usinas do sistema, afetando basicamente a geração ou absorção de potência reativa pela máquina, sendo que o ponto de operação do sistema não é praticamente afetado.

Desta forma, com o intuito de se efetuar a Melhoria de Segurança Dinâmica em sistemas elétricos de potência com problemas de estabilidade transitória previamente detetados, neste trabalho procurar-se-á estabelecer o quão está relacionada a tensão interna das máquinas síncronas com a melhoria da margem de segurança e, conseqüentemente, com a estabilidade transitória do sistema.

### 3.2.2. Analogia com o Critério de Áreas Iguais

Neste momento, aprofundar-se-á a análise em torno da influência da tensão na estabilidade transitória, procurando-se evidenciá-la mediante a analogia com o modelo máquina síncrona x barra infinita através da análise pelo Critério de Áreas Iguais.

Desta forma, como pode-se observar na Figura 2, considera-se um sistema elétrico constituído por um gerador conectado, através de duas linhas de transmissão, à barra infinita. As linhas de transmissão são representadas por suas respectivas reatâncias série e supõe-se a ocorrência de um curto-circuito trifásico em uma delas,

sendo a eliminação do defeito efetuado através da abertura da linha sob defeito.

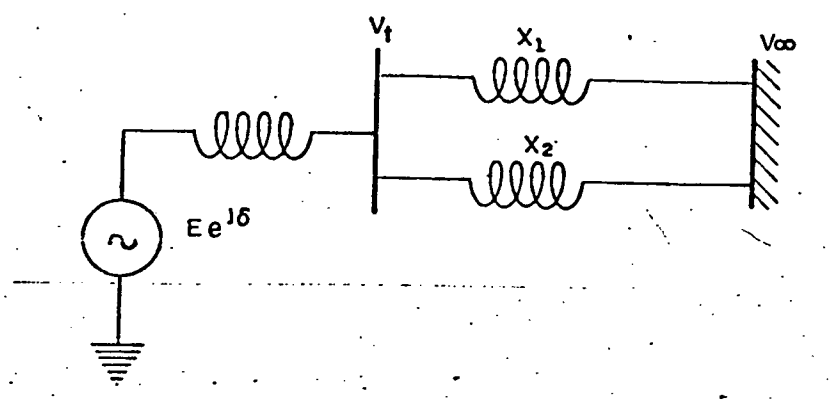


Figura 2. Gerador conectado à barra infinita

Considerando-se nulo o amortecimento do sistema, as equações que representam o movimento relativo do sistema durante o período transitório são expressas por [10] :

$$\begin{aligned} M_i \dot{\omega}_i &= P_{m_i} - P_{e_i} \\ \dot{\delta}_i &= \omega_i \end{aligned} \quad (3.2.2.1)$$

onde :

$P_{e_i}$  = potência elétrica fornecida pelo gerador ao sistema [pu]

$$= E_i \cdot V_i \cdot \text{sen } \delta_i / X_{eq_i}$$

$X_{eq_i}$  = reatância equivalente entre a barra interna do gerador e a barra infinita [pu]

$M_i$  = constante de inércia do gerador [s]

$P_{m_i}$  = potência mecânica de entrada do gerador [pu]

- $\delta_i$  = diferença angular entre a tensão interna do gerador e a barra infinita [rad. elét.]
- $\omega_i$  = desvio de velocidade do gerador [rad. elét./s]
- $E_i$  = tensão interna do gerador [pu]
- $V_i$  = tensão da barra infinita [pu].

A curva potência-ângulo, ilustrando graficamente o comportamento da equação (3.2.2.1) e na qual baseia-se o Critério de Areas Iguais, é mostrado na Figura 3.

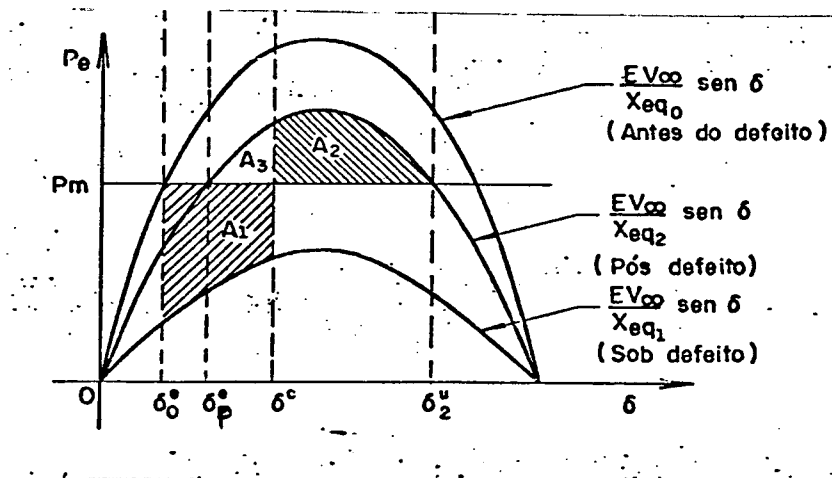


Figura 3 - Critério de Areas Iguais

onde :

- $A_1$  = área de aceleração
- $A_2$  e  $A_3$  = áreas de sincronização
- $\delta_0$  = posição angular pré-falta
- $\delta_p$  = posição angular pós-falta
- $\delta_c$  = posição angular na eliminação do defeito
- $\delta_u$  = ponto de equilíbrio pós-falta instável.

A condição suficiente para a garantia da estabilidade do sistema pelo Critério de Áreas Iguais é que [10]

$$A_1 \leq A_2 \quad . \quad (3.2.2.2)$$

Ou seja, a energia total adquirida pelo sistema durante o período de permanência do defeito deve ser menor que a energia potencial do ponto de equilíbrio instável para a configuração pós-defeito.

Nota-se que a condição de estabilidade (3.2.2.2) é melhor atendida quanto menor for a área  $A_1$  e maior a área  $A_2$ . Fisicamente, isso significa que a estabilidade é beneficiada quando a região de desaceleração da máquina (onde  $P_e > P_m$ ) é maior que a região de aceleração da mesma (onde  $P_m > P_e$ ).

Admitindo-se que a potência mecânica permanece constante durante o período transitório, a amplitude das 3 curvas potência-ângulo poderá ser incrementada pelo aumento da tensão interna da máquina, o que implicará no aumento das áreas de sincronização  $A_1$  e  $A_2$  e, desta forma, na melhoria da estabilidade transitória do sistema máquina x barra infinita.

Porém, quando se procura estender tal análise para sistemas multimáquinas (Critério Extendido de Áreas Iguais [44,45]), o aumento desproporcional da tensão interna das máquinas pode propiciar um efeito contrário ao já mencionado, prejudicando a estabilidade transitória do sistema ao invés de auxiliá-la.

Desta forma, torna-se importante estabelecer um compromisso direto entre as duas questões básicas inerentes ao método proposto :

- . Em que máquinas deve-se alterar a tensão interna ?
- . De quanto deve ser essa alteração ?

A resposta a essas duas questões fundamentais, conduz a um vetor de alteração de tensões internas das máquinas síncronas que implicará na Melhoria da Segurança Dinâmica do sistema em estudo, caso existir tal possibilidade.

### 3.3. Proposta para a Solução do Problema de Melhoria de Segurança Dinâmica

Em vista dos bons resultados obtidos com o método SLEP frente a outros métodos diretos ou numéricos citados na literatura [16,32], empregar-se-á este como ferramenta de análise da estabilidade transitória e determinação das margens de segurança, sendo essas obtidas pela expressão (2.2.4.1) :

$$\mathcal{M}_r = ( E_{crit_r} - E_{e_r} ) ./ E_{crit_r}$$

onde :

$E_{crit_r}$  = energia crítica total do sistema correspondente à  $r$ -ésima contingência

$E_{e_r}$  = energia total do sistema no instante de eliminação do defeito da  $r$ -ésima contingência.

Conforme mencionado antes, as contingências a serem consideradas na análise serão do tipo curto-circuito trifásico seguido de perda de equipamento (linhas de transmissão ou transformadores), utilizando-se



ações de controle que consistem na modificação das tensões de excitação das máquinas síncronas do sistema.

Destaca-se que, estando a tensão da máquina síncrona intimamente relacionada com a capacidade desta em gerar ou absorver potência reativa, admitir-se-á que as máquinas possuem curvas de capacidade que permitem a variação da tensão de excitação dentro de valores estabelecidos a priori.

Destaca-se novamente que, sendo o ponto de operação pré-falta determinado normalmente em função das restrições energéticas e/ou elétricas do sistema global, procurar-se-á efetuar correções que minimizem o desvio em torno do ponto de operação nominal.

Desta forma, as questões básicas a serem resolvidas pelo método proposto podem ser assim enunciadas :

- \* Que modificação no vetor associado ao perfil de tensão conduz a uma Melhoria de Segurança Dinâmica do sistema ? → questão "onde mexer ?"
- \* Se tal modificação existe, quanto deve-se caminhar ao longo delas ? → questão "quanto mexer ?".

Em vista do problema acima ser de natureza essencialmente não-linear, o que implica na dificuldade em achar-se um procedimento analítico de solução, propõe-se uma metodologia que emprega a sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão interna das máquinas. Tal metodologia consiste na obtenção de uma direção ao longo da qual efetua-se pequenos incrementos no vetor de tensões internas das máquinas, atualizando-se o cálculo das direções em

intervalos adequados, repetindo-se o processo até que seja atendido um critério de parada. Considera-se, portanto, equacionada a questão "onde mexer?". Por sua vez, a questão "quanto caminhar ao longo de tais direções?" será abordada no capítulo seguinte.

### 3.4. Cálculo da Sensibilidade da Margem de Segurança

O problema de Melhoria de Segurança Dinâmica foi apresentado no item (2.3.1) considerando-se um conjunto previamente estabelecido de contingências a serem analisadas.

Desta forma, deseja-se corrigir a margem de segurança associada à  $r$ -ésima contingência, onde  $\mathcal{M}_r \leq \mathcal{M}_{\min}$ , ou seja, quando caracteriza-se o estado inseguro do sistema. Se  $\mathcal{M}_r \leq 0$ , tem-se detetada a instabilidade do sistema na ocorrência de determinada contingência.

Para se conduzir o sistema a um estado dito seguro, emprega-se a relação (2.3.1.2) reescrita sob a forma :

$$\Delta \mathcal{M}_r \geq \mathcal{M}_{\min} - \mathcal{M}_r^0, \quad r = 1, 2, \dots, R \quad (3.4.1)$$

O acréscimo  $\Delta \mathcal{M}_r$  necessário à correção da margem de segurança em função da alteração das tensões internas das máquinas síncronas na condição pré-falta, pode ser determinado através da análise de sensibilidade de primeira ordem [26,32], a partir da expansão da margem de segurança em séries de Taylor por [32] :

$$\Delta \mathcal{M}_r = \langle \partial \mathcal{M}_r / \partial E^a, \Delta E^a \rangle \quad (3.4.2)$$

onde :

$\partial M_r / \partial E^\alpha$  = sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão interna pré-falta

$\Delta E^\alpha$  = acréscimo no vetor de tensões internas das máquinas síncronas

( $\alpha$ ) = superscrito que denota o estado de equilíbrio pré-falta.

A equação (3.4.2) representa o incremento que ocorre na margem de segurança em função da alteração das tensões internas das máquinas (tensões de excitação), na condição que precede o defeito.

A sensibilidade de primeira ordem da margem de segurança do sistema devido à r-ésima contingência em relação à tensão interna da máquina, é obtida derivando-se a equação (2.2.4.1) em relação ao vetor de tensões internas pré-falta  $E^\alpha$ , sendo dada por :

$$\partial M_r / \partial E^\alpha = \frac{\partial}{\partial E^\alpha} \left\{ \frac{E_{crit_r} - E_{e_r}}{E_{crit_r}} \right\} \quad (3.4.3)$$

onde :

$$\partial M_r / \partial E^\alpha = [ \partial M_r / \partial E_1^\alpha \quad \partial M_r / \partial E_2^\alpha \quad \dots \quad \partial M_r / \partial E_n^\alpha ]^T.$$

Após algumas transformações algébricas, a sensibilidade da margem de segurança pode ser expressa por :

$$\partial M_r / \partial E^\alpha = \frac{\frac{E_{e_r}}{E_{crit_r}} \left. \frac{\partial E_{crit_r}}{\partial E^\alpha} \right|_{(\theta_r^c, \omega_r^c)} - \left. \frac{\partial E_{e_r}}{\partial E^\alpha} \right|_{(\theta_r^e, \omega_r^e)}}{E_{crit_r}} \quad (3.4.4)$$

onde :

$$\left. \frac{\partial E_{crit_r}}{\partial E^\alpha} \right|_{\chi} = [ \left. \frac{\partial E_{crit_r}}{\partial E_1^\alpha} \right|_{\chi} \quad \left. \frac{\partial E_{crit_r}}{\partial E_2^\alpha} \right|_{\chi} \quad \dots \quad \left. \frac{\partial E_{crit_r}}{\partial E_n^\alpha} \right|_{\chi} ]^T$$

$$\left. \frac{\partial E_{e_r}}{\partial E^\alpha} \right|_{\chi} = [ \left. \frac{\partial E_{e_r}}{\partial E_1^\alpha} \right|_{\chi} \quad \left. \frac{\partial E_{e_r}}{\partial E_2^\alpha} \right|_{\chi} \quad \dots \quad \left. \frac{\partial E_{e_r}}{\partial E_n^\alpha} \right|_{\chi} ]^T$$

$\partial(.) / \partial X |_{\chi}$  = derivada parcial de (.) em relação a X avaliada em  $\chi$

(c),(e) = superscritos que denotam os estados que correspondem ao tempo crítico e ao tempo de eliminação de defeito.

Das equações (2.2.2.5) a (2.2.2.7), nota-se que a energia crítica é dependente das velocidades angulares das máquinas, enquanto que a energia potencial é função de  $P_m$ ,  $\theta^p$ ,  $\theta^e$ ,  $\omega^e$  e  $P_e$ , onde o superscrito (p) refere-se ao estado de equilíbrio pós-falta. Estando essas grandezas relacionadas com  $\theta^a$  e  $E^a$ , buscar-se-á expressar a equação (3.4.4) unicamente em função do parâmetro  $E^a$ .

Inicialmente, serão desenvolvidas as expressões referentes à segunda parcela do numerador de (3.4.4) que avaliam a sensibilidade da energia total do sistema em relação à tensão interna das máquinas no instante da eliminação de defeito.

As componentes dos gradientes da energia total do sistema em relação à tensão interna das máquinas no instante da eliminação de defeito são determinadas por meio da aplicação da regra da cadeia e expressas por :

$$\frac{\partial E_{e_r}}{\partial E_j^a} \Big|_{(\theta_r^e, \omega_r^e)} = \frac{\partial E_{c_r}}{\partial E_j^a} \Big|_{\omega_r^e} + \frac{\partial E_{p_r}}{\partial E_j^a} \Big|_{\theta_r^e} \quad (3.4.5)$$

onde :

$$\frac{\partial E_{c_r}}{\partial E_j^a} = \langle \frac{\partial E_{c_r}}{\partial \omega_r}, \frac{\partial \omega_r}{\partial E_j^a} \rangle \quad (3.4.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{p_r}}{\partial E_j^a} = & \langle \frac{\partial E_{p_r}}{\partial P_m}, \frac{\partial P_m}{\partial E_j^a} \rangle + \langle \frac{\partial E_{p_r}}{\partial \theta_r}, \frac{\partial \theta_r}{\partial E_j^a} \rangle + \\ & \langle \frac{\partial E_{p_r}}{\partial \theta_r^p}, \frac{\partial \theta_r^p}{\partial E_j^a} \rangle + \frac{\partial}{\partial E_j^a} \left\{ \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i^e} P_{e_i} d\theta_i \right\} \end{aligned} \quad (3.4.7)$$

sendo :

$E_{c_r}$  = energia cinética referente à r-ésima contingência

$E_{p_r}$  = energia potencial referente à r-ésima contingência

$$\begin{aligned} \omega_r &= [ \omega_{r_1} \ \omega_{r_2} \ \dots \ \omega_{r_n} ]^T \\ \theta_r &= [ \theta_{r_1} \ \theta_{r_2} \ \dots \ \theta_{r_n} ]^T \\ \theta_r^P &= [ \theta_{r_1}^P \ \theta_{r_2}^P \ \dots \ \theta_{r_n}^P ]^T \\ P_m &= [ P_{m_1} \ P_{m_2} \ \dots \ P_{m_n} ]^T \\ P_e &= [ P_{e_1} \ P_{e_2} \ \dots \ P_{e_n} ]^T \end{aligned}$$

Portanto, a avaliação da sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão interna das máquinas, base da metodologia proposta neste trabalho, está associada à determinação das derivadas parciais das equações (3.4.6) e (3.4.7), as quais são tratadas a seguir.

### 3.4.1. Sensibilidade da Energia Cinética em Relação à Velocidade Angular

Derivando-se parcialmente a equação da energia cinética (2.2.2.5) em relação à velocidade angular, tem-se tal sensibilidade expressa por [32] :

$$\partial E_{c_r} / \partial \omega_r = \text{Diag} ( M_s, s \in N ) \cdot \omega_r \quad (3.4.1.1)$$

### 3.4.2. Sensibilidade da Energia Potencial em Relação à Potência Mecânica

Derivando-se parcialmente a equação da energia potencial (2.2.2.6) em relação à potência mecânica, tem-se [32] :

$$\partial E_{p_r} / \partial P_m = \theta_r^P - \theta_r \quad (3.4.2.1)$$

### 3.4.3. Sensibilidade da Potência Mecânica em Relação a Tensão Interna Pré-Falta

Como a potência mecânica é suposta constante durante o período transitório, pode-se afirmar que [32] :

$$Pm_i = Pe_i^{\alpha} + \frac{M_i}{MT} \cdot PCA^{\alpha} \quad (3.4.3.1)$$

Pela Propriedade 1, tem-se que  $PCA^{\alpha} = 0$ . Portanto,

$$Pm_i = Pe_i^{\alpha} = -C_i^{\alpha} \cdot f_i^{\alpha, \alpha} + D_i^{\alpha} \cdot e_i^{\alpha, \alpha} \quad (3.4.3.2)$$

onde :

$C_i, D_i, f_i$  e  $e_i$  são grandezas anteriormente já definidas, sendo que o superescrito  $(\alpha, \alpha)$  indica que a variável associada é avaliada no estado e configuração pré-falta.

Após alguns arranjos algébricos, a equação (3.4.3.2) resulta :

$$Pm_i = -C_i^{\alpha} \cdot ( -R_{ij}^{\alpha} \cdot C_j^{\alpha} + X_{ij}^{\alpha} \cdot D_j^{\alpha} ) + D_i^{\alpha} \cdot ( R_{ij}^{\alpha} \cdot D_j^{\alpha} + X_{ij}^{\alpha} \cdot C_j^{\alpha} ) + R_{ii}^{\alpha} \cdot E_i^{\alpha 2} / X' d_i^2, \quad i \neq j \quad (3.4.3.3)$$

Desta forma, a sensibilidade da potência mecânica em relação a tensão interna pré-falta é avaliada derivando-se parcialmente a equação (3.4.3.3) e é dada por :

$$\partial Pm_i / \partial E_i^{\alpha} = Pm_i / E_i^{\alpha} + R_{ii}^{\alpha} \cdot E_i^{\alpha} / X' d_i^2$$

$$\partial Pm_i / \partial E_j^{\alpha} = \left[ R_{ij}^{\alpha} \cdot ( C_i^{\alpha} \cdot C_j^{\alpha} + D_i^{\alpha} \cdot D_j^{\alpha} ) + X_{ij}^{\alpha} \cdot ( D_i^{\alpha} \cdot C_j^{\alpha} - C_i^{\alpha} \cdot D_j^{\alpha} ) \right] / E_j^{\alpha}, \quad i \neq j \quad (3.4.3.4)$$

### 3.4.4. Sensibilidade da Energia Potencial em Relação à Posição Angular

Derivando-se parcialmente a equação da energia potencial (2.2.2.6) em relação à posição angular, obtém-se [32] :

$$\partial E_p / \partial \theta_r = P_e - P_m \quad . \quad (3.4.4.1)$$

### 3.4.5. Sensibilidade da Energia Potencial em Relação à Posição Angular Pós-falta

A partir da equação (3.4.4.1) e da Propriedade 1, deduz-se que a sensibilidade da energia potencial em relação à posição angular pós-falta é expressa por [32] :

$$\partial E_p / \partial \theta^P = 0 \quad . \quad (3.4.5.1)$$

### 3.4.6. Sensibilidade da Parcela Integral de Potência Elétrica em Relação à Tensão Interna Pré-falta

A última parcela de sensibilidade da equação (3.4.7) pode ser expressa por :

$$\frac{\partial}{\partial E_j^a} \left\{ \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} P_{e_i} d\theta_i \right\} = \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} \partial P_{e_i} / \partial E_j^a d\theta_i \quad . \quad (3.4.6.1)$$

A equação acima pode ser desmembrada em duas parcelas distintas, ou seja :

$$\frac{\partial}{\partial E_j^a} \left\{ \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} Pe_i d\theta_i \right\} = \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} \partial Pe_i / \partial E_j^a d\theta_i + \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \int_{\theta_j^p}^{\theta_j} \partial Pe_j / \partial E_j^a d\theta_j, \quad i \neq j. \quad (3.4.6.2)$$

Inserindo-se as equações (3.4.3.4) em (3.4.6.2), admitindo-se desta forma que a potência mecânica pós-falta seja de mesmo valor que a potência elétrica pré-falta, resulta que a sensibilidade da integral da potência elétrica em relação à tensão interna pré-falta é expressa por :

$$\frac{\partial}{\partial E_j^a} \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} Pe_i d\theta_i = \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \left\{ \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} \left[ R_{ij}^a (C_i^a \cdot C_j^a + D_i^a \cdot D_j^a) / E_j^a + X_{ij}^a (D_i^a \cdot C_j^a - C_i^a \cdot D_j^a) / E_j^a \right] d\theta_i \right\} + \int_{\theta_j^p}^{\theta_j} Pe_j / E_j^a d\theta_j + R_{jj}^a \cdot E_j^a \cdot (\theta_j - \theta_j^p) / X' d_j^2, \quad i \neq j. \quad (3.4.6.3)$$

O termo integral embutido nas parcelas da equação (3.4.6.3) pode ser resolvido por meio de algum método de integração numérica conhecido, sendo empregado neste trabalho, devido a sua simplicidade e rapidez, o método de integração trapezoidal.

### 3.4.7. Sensibilidade da Posição e Velocidade Angulares em Relação a Tensão Interna Pré-falta

Em qualquer instante de tempo, os gradientes de  $\theta_r^e$  e  $\omega_r^e$  poderão ser determinados derivando-se parcialmente os coeficientes das séries



de Taylor, geradas a partir do método SLEP. Tal procedimento, proposto pela referência [32], é mostrado a seguir.

As expansões da posição e velocidade angulares da  $i$ -ésima máquina síncrona podem ser expressas por :

$$\theta_i(t) = \sum_{q=0}^s \theta_i^{(q)} \bigg|_{(t_{h-1})} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} + R \cdot \theta_i \quad (3.4.7.1)$$

$$\omega_i(t) = \theta_i^{(1)}(t) \quad , \quad i \in N \quad \text{e} \quad t_{h-1} \leq t \leq t_h \quad (3.4.7.2)$$

onde :

$$\theta_i^{(q)} \bigg|_{t_{h-1}} = q\text{-ésima derivada temporal de } \theta_i, \text{ avaliada no instante } t_{h-1}$$

$t_{h-1}$  e  $t_h$  = intervalo inicial e final, respectivamente, em cada intervalo de expansão das séries de potência

$R \cdot \theta_i$  = resíduo da série de potência de  $\theta_i$  na aproximação de ordem  $s$

(d) = superescrito que representa a configuração sob defeito.

A precisão destas aproximações (considerando-se desprezíveis os resíduos) está relacionada à magnitude do período analisado, ordem das aproximações, nível de carregamento do sistema, etc..

Através de sucessivas aproximações de (3.4.7.1) e (3.4.7.2) e desprezando-se os resíduos das séries de potência, torna-se possível avaliar-se as sensibilidades de  $\theta_r^e$  e  $\omega_r^e$  em relação às tensões internas pré-falta da  $j$ -ésima máquina síncrona por meio das equações

$$\frac{\partial \theta_i(t)}{\partial E_j^a} \Big|_{q=0} = \sum_{q=0}^s \frac{\partial \theta_i^{(q)}(t)}{\partial E_j^a} \Big|_{(th-1)} \cdot \frac{(t - th-1)^q}{q!} \quad (3.4.7.3)$$

$$\frac{\partial \omega_i(t)}{\partial E_j^a} = \frac{\partial \theta_i^{(1)}(t)}{\partial E_j^a}, \quad i, j \in N \text{ e } th-1 \leq t \leq th. \quad (3.4.7.4)$$

Para a solução das equações acima, torna-se necessária a determinação dos coeficientes das séries de potência. Assim, generalizando-se as equações (3.4.7.1) e (3.4.7.2), obtém-se :

$$\theta_i^{(1)} = \omega_i \quad (3.4.7.5)$$

$$\theta_i^{(2)} = \frac{1}{M_i} \left[ Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{MT} \sum_{k \in N} (Pm_k - Pe_k) \right] \quad (3.4.7.6)$$

$$\vdots$$

$$\theta_i^{(q)} = \frac{-1}{M_i} Pe_i^{(q-2)} + \frac{1}{MT} \sum_{k \in N} Pe_k^{(q-2)} \quad (3.4.7.7)$$

$$i \in N, \quad q = 3, 4, \dots, s.$$

Partindo-se da expressão da potência elétrica (2.2.1.7), determina-se suas derivadas temporais na forma :

$$Pe_i^{(m)} = \sum \tau_{(m+1),q} \cdot \left[ D_i^{(m-q+1)} \cdot e_i^{(q-1)} - C_i^{(m-q+1)} \cdot f_i^{(q-1)} \right],$$

$$i \in N, \quad m = 1, 2, \dots, (s-2) \quad (3.4.7.8)$$

onde o operador  $\tau$  é definido por :

$$\tau_{(m+1),1} = \tau_{q,q} = 1$$

$$\tau_{(m+1),q} = \tau_{mq} + \tau_{m,(q-1)}$$

Por se tratar de equações de natureza recursiva, o cálculo das equações (3.4.7.8) é rápido, não propiciando um aumento computacional

significativo durante sua solução.

Das equações (2.2.1.8) e (2.2.1.9), sabe-se que :

$$C_i = E_i \cdot \cos \theta_i / X' d_i$$

$$D_i = E_i \cdot \text{sen } \theta_i / X' d_i, \quad i \in N.$$

Então, as suas derivadas temporais de primeira ordem são determinadas por :

$$C_i^{(1)} = - D_i \cdot \theta_i^{(1)} \quad (3.4.7.9)$$

$$D_i^{(1)} = C_i \cdot \theta_i^{(1)}, \quad i \in N. \quad (3.4.7.10)$$

Generalizando-se, as derivadas temporais de ordem superior de  $C_i$  e  $D_i$  são expressas por :

$$C_i^{(m)} = - \sum_{q=1}^m \tau_{mq} \cdot \theta_i^{(m-q+1)} \cdot D_i^{(q-1)} \quad (3.4.7.11)$$

$$D_i^{(m)} = \sum_{q=1}^m \tau_{mq} \cdot \theta_i^{(m-q+1)} \cdot C_i^{(q-1)}. \quad (3.4.7.12)$$

As equações (3.4.7.8) a (3.4.7.12) são também solucionadas de forma recursiva.

As derivadas temporais de  $e_i$  e  $f_i$  são determinadas a partir das equações (2.2.1.12) e (2.2.1.13), obtendo-se :

$$e_i^{(l)} = \sum_{k \in N} [ R_{ik} \cdot D_k^{(l)} + X_{ik} \cdot C_k^{(l)} ] \quad (3.4.7.13)$$

$$f_i^{(l)} = \sum_{k \in N} [ -R_{ik} \cdot C_k^{(l)} + X_{ik} \cdot D_k^{(l)} ], \quad i \in N \quad (3.4.7.14)$$

onde  $D_k^{(l)}$  e  $C_k^{(l)}$  são calculados através das equações recursivas (3.4.7.9) a (3.4.7.11), concluindo-se, desta forma, o cálculo das derivadas temporais de  $\theta_i$  e  $\omega_i$ .

Os resultados acima apresentados possibilitam a geração de derivadas temporais de ordem genérica, podendo as séries de potência (3.4.7.3) e (3.4.7.4) serem determinadas sistematicamente para qualquer ordem  $s$ .

Portanto, das equações (3.4.7.8) a (3.4.7.14), as sensibilidades de  $\theta_i$  e  $\omega_i$  em determinado instante da trajetória de estados com relação a tensão interna genérica  $E_j^\alpha$  são dadas por :

$$\frac{\partial Pe_i^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} = \sum_{q=1}^{m+1} \tau_{(m+1),q} \cdot \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial D_i^{(m-q+1)}}{\partial E_j^\alpha} \cdot e_i + D_i \cdot \frac{\partial e_i^{(q-1)}}{\partial E_j^\alpha} - \frac{\partial C_i^{(m-q+1)}}{\partial E_j^\alpha} \cdot f_i \\ - C_i \cdot \frac{\partial f_i^{(q-1)}}{\partial E_j^\alpha} \end{array} \right] \quad (3.4.7.15)$$

onde :

$$\frac{\partial D_i^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} = \sum_{q=1}^m \tau_{mq} \cdot \left[ \frac{\partial \theta_i^{(m-q+1)}}{\partial E_j^\alpha} \cdot C_i + \theta_i \cdot \frac{\partial C_i^{(q-1)}}{\partial E_j^\alpha} \right] \quad (3.4.7.16)$$

$$\frac{\partial C_i^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} = -\sum_{q=1}^m \tau_{mq} \cdot \left[ \frac{\partial \theta_i^{(m-q+1)}}{\partial E_j^\alpha} \cdot D_i + \theta_i \cdot \frac{\partial D_i^{(q-1)}}{\partial E_j^\alpha} \right] \quad (3.4.7.17)$$

$$\frac{\partial e_i^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} = \sum_{k \in N} \left[ R_{ij} \cdot \frac{\partial D_k^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} + X_{ij} \cdot \frac{\partial C_k^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} \right] \quad (3.4.7.18)$$

$$\frac{\partial f_i^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} = \sum_{k \in N} \left[ -R_{ij} \cdot \frac{\partial C_k^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} + X_{ij} \cdot \frac{\partial D_k^{(m)}}{\partial E_j^\alpha} \right] \quad (3.4.7.19)$$

Para a conclusão do cálculo das sensibilidades de  $\theta_i(t)$  e  $\omega_i(t)$  em relação à tensão interna das máquinas, expressas pelas equações (3.4.7.3) e (3.4.3.4), faz-se necessário determinar as condições de partida do processo recursivo no qual está inserido o desenvolvimento das séries de potência, ou seja, os valores  $\partial\theta_i^a/\partial E_j^a$  e  $\partial\omega_i^a/\partial E_j^a$ .

Devido à existência de um fraco acoplamento elétrico entre as grandezas  $E^a$  e  $\theta^a$ , ou seja, variações na tensão interna afetam muito pouco a posição angular, pode-se considerar as expressões :

$$\frac{\partial\theta_i^a}{\partial E_j^a} \approx 0 \quad (3.4.7.20)$$

$$\frac{\partial\omega_i^a}{\partial E_j^a} \approx 0 \quad (3.4.7.21)$$

o que indica que as condições de partida das séries de potência serão adotadas como nulas.

Ressalta-se que as simplificações assumidas acima são coerentes com as premissas inerentes ao cálculo do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido, conforme pode ser visto nas referências Monticelli [34] e Stagg & El-Abiad [40].

### 3.4.8. Sensibilidade da Energia Crítica Total Relativa à Tensão Interna Pré-Falta

As expressões anteriormente desenvolvidas são suficientes para o cálculo da sensibilidade da energia total do sistema no instante de eliminação do defeito. Para a conclusão do cálculo da sensibilidade

da margem de segurança (3.4.4), falta ainda a parcela da sensibilidade da energia crítica total, a qual é detalhadamente abordada na referência Minussi [32] e transcrita abaixo de forma simplificada.

O sistema dinâmico (2.2.1.3), por desprezar o amortecimento, é dito conservativo. Portanto, considerando-se o tempo de eliminação de defeito coincidente com  $t_{crit}$  (tempo crítico de eliminação de defeito), a energia total do sistema deverá se manter constante durante a evolução da trajetória pós-falta, sendo definida por :

$$E (\theta_r(t_{crit}), \omega_r(t_{crit})) = E (\theta_r^c, \omega_r^c) \quad (3.4.8.1)$$

onde :

$E (\theta_r(t_{crit}), \omega_r(t_{crit}))$  = estado do sistema sobre a trajetória de defeito correspondente ao tempo crítico

$E (\theta_r^c, \omega_r^c)$  = energia crítica total do sistema determinada pelo método SLEP.

Calculando-se os gradientes em ambos os lados da equação (3.4.8.1), obtém-se as expressões :

$$\nabla E (\theta_r(t_{crit}), \omega_r(t_{crit})) \simeq \partial E / \partial E^a \Big|_{(\theta_r(t_{crit}), \omega_r(t_{crit}))} \quad (3.4.8.2)$$

sendo calculada na trajetória sob defeito, utilizando-se o processo anteriormente apresentado para a obtenção da sensibilidade da energia total no tempo de eliminação de defeito  $t_e$  e

$$\nabla E (\theta_r^c, \omega_r^c) \simeq \partial E / \partial E^a \Big|_{(\theta_r^c, \omega_r^c)} \quad (3.4.8.3)$$

Pode-se observar que [32] :

$$\nabla E (\theta_r^c, \omega_r^c) \approx - \nabla E ( \theta_r(t_{crit}), \omega_r(t_{crit}) ) \quad . \quad (3.4.8.4)$$

Desta forma, o gradiente  $\nabla E (\theta_r^c, \omega_r^c)$  pode ser estimado com boa precisão através de  $-\nabla E ( \theta_r(t_{crit}), \omega_r(t_{crit}) )$ , sendo este avaliado através do uso de séries de potencia, conforme proposto acima. Ressalta-se que este procedimento não apresenta custo computacional adicional, pois no cálculo da sensibilidade da energia total em  $t_e$  ( $t_e > t_{crit}$ , o que caracteriza margem de segurança negativa), por sucessivas aproximações, a sensibilidade da energia crítica é também determinada, bastando apenas armazenar-se o valor da sensibilidade correspondente ao tempo crítico.

Sendo o procedimento proposto baseado no método SLEP, o qual considera as trajetórias pós-falta, a sensibilidade da energia crítica (3.4.8.4) implicitamente está associada ao comportamento do sistema pós-falta. Desta forma, esta sensibilidade será empregada no sentido de se alterar o ponto de operação pré-falta, para que o tempo crítico seja maior, ou seja, a margem de segurança dinâmica seja aumentada.

### 3.5. Algoritmo Conceitual Para a Solução do Problema de Melhoria de Segurança Dinâmica

Após a obtenção das expressões acima, pode-se descrever de forma conceitual o problema da análise de estabilidade transitória, baseada no emprego do método SLEP e da Melhoria de Segurança Dinâmica através da análise de sensibilidade, empregando-se o algoritmo computacional mostrado abaixo.

Algoritmo Conceitual de Análise e Melhoria de Segurança Dinâmica

Passo 01. Inicialização do programa.

Passo 02. Leitura de dados de linhas, transformadores, máquinas, contingências e outros parâmetros do sistema.

$i \leftarrow 0, r \leftarrow 0.$

Passo 03. Contador de contingências sob análise.

$r \leftarrow r + 1.$

Passo 04. Cálculo do ponto de equilíbrio pós-falta.

- \* O ponto de equilíbrio pós-falta é estável ?
- . Positivo. Vá para o Passo 05.
- . Negativo. Volte ao Passo 03.

Passo 05. Cálculo da margem de segurança através do SLEP.

$$\mathcal{M}_r \leftarrow ( \text{Ecrit}_r - Ee_r ) / \text{Ecrit}_r$$

Passo 06. Comparação da margem de segurança.

- \*  $\mathcal{M}_r \geq \mathcal{M}_{\min}$  ?
- . Positivo (contingência em segurança). Vá ao Passo 09.
- . Negativo (contingência em sobrecarga). Vá ao Passo 07.

Passo 07. Contador de contingências em sobrecarga.

$i \leftarrow i + 1.$

Passo 08. Armazenamento do índice e da margem de segurança da



contingência em sobrecarga em vetores.

$$l(i) \leftarrow r \quad \text{e} \quad m(i) \leftarrow M_r .$$

Passo 09. Teste de encerramento da análise.

\*  $r$  é a última contingência ?

. Positivo. Vá para o Passo 10.

. Negativo. Volte ao Passo 03.

Passo 10. Verificação de contingências em segurança.

\*  $i = 0$  ?

. Positivo. Emitir relatório de saída. Fim do programa.

. Negativo. Vá para o Passo 11.

Passo 11. Algoritmo de Melhoria de Segurança Dinâmica (item 4.2).

Volte ao Passo 03 para reavaliação dos resultados obtidos.

### 3.5. Conclusão

Neste capítulo, mostrou-se através da analogia com o Critério de Areas Iguais que a tensão influi consideravelmente na estabilidade transitória e, conseqüentemente, na margem de segurança, constituindo uma ação de controle para a Melhoria de Segurança Dinâmica.

Discutiu-se ainda o problema da Melhoria de Segurança Dinâmica em sistemas elétricos de potência, empregando-se o método SLEP, o conceito de margem de segurança e a análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade foi empregada com o propósito de se desenvolver uma relação matemática entre a margem de segurança e o

vetor de tensões internas pré-falta das máquinas síncronas. Com isto, obtém-se indicações das alterações nesse vetor de tensões que mais afetam a margem de segurança do sistema (questão "onde mexer?").

O cálculo da sensibilidade da margem de segurança implicou na obtenção de diversas expressões, tendo como aspecto relevante a consideração dos ângulos e velocidades angulares das máquinas síncronas associadas às trajetórias do sistema sob defeito obtidas através da expansão em séries de Taylor. Tais sensibilidades são calculadas através de um algoritmo recursivo, cuja precisão é função da frequência de reavaliação dos coeficientes e da ordem de aproximação das séries de potência.

Portanto, a partir das expressões apresentadas e para cada contingência  $r$ , determina-se um vetor de sensibilidade  $\nabla M_r$ . Desta forma, dado um conjunto de  $R$  contingências em sobrecarga, obtém-se uma matriz de sensibilidade  $(n \times R)$ , sendo  $n$  o número de máquinas síncronas do sistema.

## CAPÍTULO 4

USO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA MELHORIA DA SEGURANÇA DINÂMICA

## 4.1. Introdução

Considerando o comportamento transitório do sistema para faltas tipo curto-circuito trifásico seguido de perda de equipamento e gerada através da margem de segurança, método SLEP e análise de sensibilidade, a relação (3.4.2) fornece uma indicação de quais máquinas síncronas devem ter suas tensões internas alteradas de modo a propiciar uma melhoria da margem de segurança dinâmica e, conseqüentemente, da estabilidade transitória do sistema.

Neste capítulo, será proposto uma metodologia que emprega a alteração de tensão das barras externas de geração como ação de controle na Melhoria da Segurança Dinâmica do sistema. Outros recursos de controle podem ser adotados com o mesmo intuito, não sendo, entretanto, abordados neste trabalho.

## 4.2. Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação às Tensões das Barras Externas de Geração

Na operação de sistemas elétricos de potência, a tensão interna das máquinas síncronas não se apresenta como uma indicação usual do perfil de tensão global dos sistema, estando diretamente relacionada com a absorção ou geração de potência reativa pelas máquinas. Ao

contrário disto, a tensão externa das barras de geração ( barras PV ) constituem-se em parâmetros mais expressivos no controle de tensão nodal, sendo sua monitoração de uso corrente em estudos de estabilidade.

Adicionando-se ao acima exposto que, neste trabalho, a rede de transmissão é analisada sem redução às barras internas de geração (preservação da topologia da rede), determinar-se-á uma expressão, derivada da equação (3.4.2), que quantifica o acréscimo necessário à correção da margem de segurança em função de acréscimos no vetor de tensões terminais das máquinas síncronas.

Admitindo-se pequenas variações incrementais em torno do ponto nominal de operação pré-falta do sistema, pode-se determinar uma relação linear entre a variação de tensão interna da máquina e a variação de tensão da barra externa de geração, ou seja

$$\Delta E^a = H^a \cdot \Delta Vg^a \quad (4.2.1)$$

onde :

$\Delta E^a$  = variação de tensão interna pré-falta da máquina

$\Delta Vg^a$  = variação de tensão pré-falta da barra externa da máquina

$$H^a = [ H_{ij} ] = \partial E_i / \partial v g_j \quad (4.2.2)$$

Juntando-se as equações (3.4.1) e (3.4.2), tem-se :

$$\langle \partial M_r / \partial E^a , \Delta E^a \rangle \geq M_{\min} - M^0 \quad (4.2.3)$$

Desta maneira, inserindo-se (4.2.1) em (4.2.3), resulta :

$$\langle \partial M_r / \partial E^a , H^a \cdot \Delta Vg^a \rangle \geq M_{\min} - M^0 \quad (4.2.4)$$

que também pode ser escrita na forma

$$\left( \frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial V_g^a} \right)^T \cdot \Delta V_g^a \geq \mathcal{M}_{\min} - \mathcal{M}^o \quad (4.2.5)$$

onde :

$$\frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial V_g^a} = \left( \frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial E^a} \right)^T \cdot H^a \quad (4.2.6)$$

Portanto, torna-se útil a determinação dos elementos da matriz  $H^a$ , os quais representam a relação entre as tensões internas e externas das máquinas síncronas que integram o sistema.

Conforme já mencionado no item 2.2.1. através das equações (2.2.1.14) e (2.2.1.15), a tensão interna da máquina síncrona pode ser expressa basicamente em função da tensão da barra externa de geração e do carregamento nominal da máquina, resultando em [01] :

$$E_i = A_i + j B_i \quad (4.2.7)$$

onde :

$$A_i = v g_i + (Q e_i \cdot X' d_i) / v g_i$$

$$B_i = (P e_i \cdot X' d_i) / v g_i$$

sendo o módulo da tensão interna calculado por

$$|E_i| = (A_i^2 + B_i^2)^{1/2} \quad (4.2.8)$$

Desta forma, a matriz  $H^a$  pode ser determinada pela expressão

$$\frac{\partial E_i}{\partial v g_j} = \frac{\partial}{\partial v g_j} \left\{ [A_i^2 + B_i^2]^{1/2} \right\} \quad (4.2.9)$$

que resulta em :

$$\frac{\partial E_i}{\partial v g_j} = \frac{1}{E_i} [A_i \cdot \frac{\partial A_i}{\partial v g_j} + B_i \cdot \frac{\partial B_i}{\partial v g_j}] \quad (4.2.10)$$

A primeira parcela da expressão acima é avaliada derivando-se a equação (2.2.1.14) em relação à tensão externa de geração, ou seja :

$$\frac{\partial A_i}{\partial v g_j} = \frac{\partial}{\partial v g_j} \left[ v g_i + \frac{Q e_i \cdot X' d_i}{v g_i} \right] \quad (4.2.11)$$

que, após alguns arranjos, resulta em :

$$\frac{\partial A_i}{\partial v g_j} = \left( 1 - \frac{Q e_i \cdot X' d_i}{v g_i^2} \right) \frac{\partial v g_i}{\partial v g_j} + \left( \frac{X' d_i}{v g_i} \right) \frac{\partial Q e_i}{\partial v g_j} \quad (4.2.12)$$

A potência reativa fornecida ou absorvida por uma máquina síncrona é expressa por [40] :

$$Q e_i = \sum_{j=1}^n v g_i \cdot v g_j \cdot Y_{ij} \cdot \text{sen} (\psi_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad , \quad i = 1, 2, n-1. \quad (4.2.13)$$

onde :

$v g_i, v g_j$  = módulo de tensão das barras externas das máquinas  $i$  e  $j$

$Y_{ij}$  = módulo da condutância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$

$\psi_{ij}$  = ângulo da condutância de transferência  $Y_{ij}$

$\delta_i, \delta_j$  = ângulo da tensão externa das máquinas  $i$  e  $j$ .

Desta forma pode-se calcular a derivada parcial da potência reativa da máquina síncrona em relação à tensão da barra externa, empregando-se as expressões que compõem a matriz Jacobiana do Método Newton-Raphson [40] :

$$\frac{\partial Q e_i}{\partial v g_i} = 2 \cdot v g_i \cdot Y_{ii} \cdot \text{sen} \psi_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n v g_j \cdot Y_{ij} \cdot \text{sen} (\psi_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

$$\frac{\partial Q e_i}{\partial v g_j} = v g_i \cdot Y_{ij} \cdot \text{sen} (\psi_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad , \quad i \neq j \quad (4.2.14)$$

De maneira similar à equação (4.2.11), a segunda parcela da expressão (4.2.10) é avaliada derivando-se a equação (2.2.1.15) em relação à tensão externa de geração, ou seja :

$$\partial B_i / \partial v g_j = \frac{\partial}{\partial v g_j} \left[ \frac{P e_i \cdot X' d_i}{v g_i} \right] \quad (4.2.15)$$

que, após algumas transformações algébricas, resulta em :

$$\partial B_i / \partial v g_j = (X' d_i / v g_i) \frac{\partial P e_i}{\partial v g_j} - (X' d_i \cdot P e_i / v g_i^2) \frac{\partial v g_i}{\partial v g_j} \quad (4.2.16)$$

Como em redes de EAT as premissas básicas do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido são satisfeitas, pode-se admitir um fraco acoplamento elétrico entre a potencia ativa entregue pela máquina síncrona e a tensão da barra externa de geração. Por este motivo, pode-se concluir que [34,40] :

$$\partial P e_i / \partial v g_j = 0 \quad (4.2.17)$$

Admitindo-se ainda que as tensões das barras externas de geração são influenciadas diretamente pelo nível de excitação da respectiva máquina síncrona a ela acoplada, ou seja, verifica-se um acoplamento muito fraco entre as tensões externas das máquinas do sistema (condutancias de transferência são pequenas ), pode-se admitir que :

$$\begin{aligned} \partial v g_i / \partial v g_i &= 1 \\ \partial v g_i / \partial v g_j &= 0 \quad , \quad i \neq j \quad . \end{aligned} \quad (4.2.18)$$

Portanto, empregando-se as equações (4.2.11) a (4.2.18), após algumas transformações algébricas chega-se a expressão final dos coeficientes que compõem a matriz  $H^a$ , ou seja :

$$\frac{\partial E_i}{\partial v g_i} = \frac{1}{E_i} \left\{ v g_i - (Q e_i^2 \cdot X' d_i^2 / v g_i^3) - (P e_i^3 \cdot X' d_i^2 / v g_i^3) + \right. \\ \left. [X' d_i + (Q e_i \cdot X' d_i^2 / v g_i^2)] \cdot [2 \cdot v g_i \cdot Y_{i i} \cdot \text{sen } \psi_{i i} + \right. \\ \left. \sum_{j=1}^n v g_j \cdot Y_{i j} \cdot \text{sen } (\psi_{i j} + \delta_i - \delta_j)] \right\} \\ \frac{\partial E_i}{\partial v g_j} = \frac{1}{E_i} \left\{ [X' d_i + (Q e_i \cdot X' d_i^2 / v g_i^2)] \cdot v g_i \cdot Y_{i j} \cdot \text{sen } (\psi_{i j} + \delta_i - \delta_j) \right\} \\ i \neq j \quad . \quad (4.2.19)$$

Concluída a expressão de cálculo dos elementos da matriz  $H^a$ , a expressão (4.2.5) passa a representar o incremento no vetor de tensão das barras externas de geração, necessário à correção da margem de segurança para um valor maior ou igual ao mínimo permissível ( $M_{\min}$ ).

Finalizando-se, nota-se que a matriz  $H^a$  é avaliada considerando-se o estado de equilíbrio e topologia pré-falta, ou seja, sua avaliação ocorre uma única vez, sem custo computacional expressivo, sendo também independente da condição de defeito. Entretanto, o cálculo da parcela  $\partial M_r / \partial E^a$ , avaliada para todas as contingências em sobrecarga, traduz-se em aumento do tempo computacional dispendido, à medida em que se aumenta a dimensão do sistema em estudo e o número de contingências analisadas.

#### 4.3. Melhoria da Segurança Via Alteração das Tensões Terminais

A parcela  $\partial M_r / \partial V g^a$  da equação (4.2.5) quantifica a sensibilidade da margem de segurança do sistema em relação à alteração nas tensões terminais das máquinas síncronas, indicando as barras nas quais os



incrementos de tensão produzem resultados mais eficazes para a Melhoria da Segurança Dinâmica.

Com isso, considera-se equacionada a questão básica " onde mexer? " discutida no item 3.2, ficando ainda em aberto a resposta para a outra questão básica da Melhoria de Segurança Dinâmica : " quanto mexer ? " .

Para esse fim, propõe-se um procedimento heurístico de Melhoria de Segurança Dinâmica via alteração das tensões das barras externas de geração, baseado nas indicações de sensibilidade resultantes da etapa anterior.

#### 4.3.1. Alteração das Tensões Terminais Via Otimização

Pelo fato da tensão das barras PV afetar muito pouco o ponto de operação do sistema, que é mais diretamente influenciado pelo despacho adotado nas usinas, a metodologia proposta, pela sua própria natureza, já satisfaz ao critério de minimização do desvio do ponto de operação nominal. Contudo, durante o procedimento de alteração do perfil de tensão nodal, devem ser respeitadas as restrições inerentes do sistema : limites de tensão admissíveis nas barras externas de geração, curva de capacidade das máquinas síncronas, carregamento das linhas de transmissão e transformadores que conectam as máquinas ao sistema, etc..

Desta forma, a solução do problema de Melhoria de Segurança Dinâmica é tratada como um problema de controle preventivo com restrições estáticas e dinâmicas (equação (4.2.5)), resultando no problema de otimização [30] :

$$\text{Minimizar FO} = f(\Delta Vg^a) \quad (4.3.1.1)$$

Sujeito a :

### 1. Restrições de Estabilidade Transitória

$$\langle \partial \mathcal{M}_r / \partial v g^a, \Delta v g^a \rangle \geq \mathcal{M}_{\min} - \mathcal{M}^0, \quad r = 1, 2, \dots, R \quad (4.3.1.2)$$

### 2. Restrições das Limitações Físicas das Máquinas

$$v g_{\min_i} \leq v g_i \leq v g_{\max_i}, \quad i \in N \quad (4.2.1.3)$$

onde :

$v g_{\min_i}, v g_{\max_i}$  = Limites mínimo e máximo permissível de tensão da barra externa de geração

R = Número de contingências em sobrecarga.

### 3. Restrições de Capacidade da Rede de Transmissão

Sendo o problema de otimização formulado para a solução da Melhoria de Segurança Dinâmica, não serão consideradas restrições de capacidade da rede de transmissão, embora pudessem ter sido consideradas. Isto é efetuado para simplificação do problema a ser resolvido. Com isso, admite-se que a rede tenha capacidade de absorver as mudanças no perfil de tensão nodal necessárias à melhoria da margem de segurança.

Portanto, o problema de Melhoria de Segurança Dinâmica via alteração das tensões das barras externas de geração, é solucionado

através da otimização da função objetivo (4.3.1.1), sujeita às restrições (4.3.1.2) a (4.3.1.3). Este procedimento de melhoria da margem de segurança pode ser melhor compreendido através da ilustração abaixo.

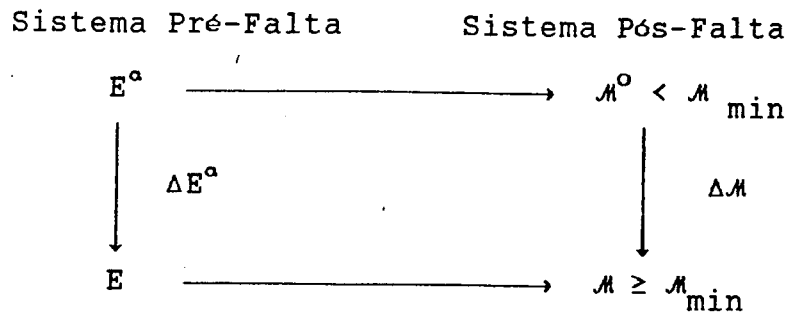


Figura 4. - Melhoria da margem de segurança dinâmica do sistema através da tensão interna das máquinas síncronas

#### 4.3.2. Determinação das Contingências a Serem Monitoradas

Empregando-se o método SLEP, as contingências são ordenadas de acordo com o critério da margem de segurança.

As contingências que apresentarem margem de segurança inferior ao valor da margem de segurança mínima permissível ( $M_{\min}$ ), passam a compor o conjunto de contingências em sobrecarga a serem monitoradas, para as quais devem ser gerados os respectivos vetores de sensibilidade da margem de segurança.

Nesta metodologia, objetiva-se melhorar apenas a margem da contingência que apresenta a menor margem de segurança (dita como a contingência mais severa), o que simplifica a solução do problema de

otimização expresso nas equações (4.3.1.1)-(4.3.1.3), dispensando o uso de técnicas mais sofisticadas de otimização numérica, como a programação linear. Este procedimento empírico baseia-se no fato de que, ao melhorar-se a margem da contingência mais severa, as contingências em sobrecarga restantes também têm suas margens melhoradas, conforme se poderá observar no Capítulo 5.

#### 4.3.3. Algoritmo de Modificação da Tensão Terminal

Empregando-se as indicações de quais barras são mais sensíveis a alterações de tensão objetivando a melhoria da margem de segurança (expressão (4.2.5)), propõe-se um algoritmo de determinação dos incrementos de tensão das barras externas de geração, o qual interage com o Algoritmo Conceitual descrito no item 3.5.

##### Algoritmo de Alteração das Tensões Terminais

###### Passo 1. Inicialização :

- . Se o número máximo de iterações não foi excedido na  $k$ -ésima alteração, vá para o Passo 2.
- . Do contrário, finalizar o procedimento de alteração das tensões terminais.

Passo 2. Leitura dos dados relativos às contingências em sobrecarga na  $k$ -ésima modificação, da tensão das barras externas de geração da modificação anterior  $Vg_j^{(k-1)}$ , dos limites inferior  $Vg_{\min}$  e superior  $Vg_{\max}$  admissíveis para as barras

externas de geração e do incremento máximo de tensão  $\Delta Vg_{\max}$

Passo 3. Cálculo da sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão das barras externas de geração para as contingências em sobrecarga.

Passo 4. Dentre as contingências em sobrecarga na  $k$ -ésima alteração, classificar a contingência que apresenta a menor margem de segurança (contingência mais severa), a qual passa a ser a contingência a ser monitorada para a Melhoria da Segurança Dinâmica

$$M^{\circ} = \text{Min}_i M_i^{\circ}.$$

Passo 5. Ordenar as sensibilidades da margem de segurança  $S_j^{(k)}$  relativas à contingência mais severa da  $k$ -ésima modificação, denotando-se por máxima sensibilidade aquela de maior módulo

$$MS^{(k)} = \text{Max}_i | S_i^{(k)} | .$$

Passo 6. Para cada barra externa de geração, faça :

$$\Delta Vg_j^{(k)} = \frac{S_j^{(k)} \cdot \Delta Vg_{\max}}{MS^{(k)}}$$

$$Vg_j^{(k)} = Vg_j^{(k-1)} + \Delta Vg_j^{(k)}$$

. Se  $Vg_j^{(k)} > Vg_{\max}$  , ent, o  $Vg_j^{(k)} = Vg_{\max}$

. Se  $Vg_j^{(k)} < Vg_{\min}$  , ent, o  $Vg_j^{(k)} = Vg_{\min}$  .

Passo 7. Processar o Fluxo de Potência da  $(k+1)$ -ésima alteração com as modificações do Passo 6. Voltar ao Algoritmo Conceitual.

#### 4.3.4. Considerações Sobre o Modelo Desenvolvido

A análise de sensibilidade do modelo (3.4.2) é linear e tem por objetivo solucionar o problema de estabilidade transitória, que é de natureza fortemente não-linear. Desta forma, as alterações de margem devem ser efetuadas dentro de uma faixa de valores que não comprometam a validade e precisão dos resultados [32].

Uma alternativa para este problema consiste no desenvolvimento de um modelo que empregue a análise de sensibilidade de ordem superior, uma vez que o cálculo da sensibilidade de primeira ordem pode ser facilmente estendido para ordens mais alta, como nas referências [43,44,45] que empregam a sensibilidade de segunda ordem. Contudo, tal procedimento implica num aumento significativo do tempo de cálculo e da memória requerida para a solução do problema [32].

Quando  $\Delta M_r$  é significativo, situação essa comum nos problemas de Melhoria de Segurança Dinâmica, a solução do problema pode ser determinada através de processo iterativo. O passo para o processo iterativo, levando-se em conta a reduzida faixa de variação de tensão em barras PV (  $1.0 \pm 5\% \text{ pu}$  ), deve ser estimado considerando-se a relação passo x número de iterações.

Quando se adota no processo iterativo um passo muito pequeno (maior precisão do modelo 3.4.2), tem-se um aumento do número necessário de iterações para o deslocamento da margem de segurança  $M^o$  a um valor desejado  $M_{\min}$ , o que dispense um tempo computacional maior para a solução do problema. Do contrário, quando se aumenta o

passo do processo iterativo (redução da precisão do modelo 3.4.2), o número de iterações necessárias e o tempo computacional diminuem. Desta forma, a escolha de um passo aceitável para o processo iterativo proposto, deve levar em conta estas variáveis dependentes entre si : tamanho do passo, precisão requerida, número de iterações e tempo computacional.

Portanto, neste trabalho, adotar-se-á o uso de sucessivas linearizações da margem de segurança em torno do ponto nominal de operação, empregando-se incrementos de tensão em torno de 2 % , conforme experiências efetuadas durante a aplicação da metodologia. O critério de parada para o término do procedimento iterativo consiste em se satisfazer pelo menos uma das seguintes premissas :

- a margem de segurança desejada  $\mathcal{M}_{\min}$  foi alcançada ou
- o número máximo de iterações foi atingido.

Finalizando-se, destaca-se, como poderá ser visto no Capítulo 5, que o maior ganho na margem de segurança é obtido nas primeiras iterações. Nas iterações seguintes, o ganho tende a tornar-se pouco expressivo [32], uma vez que esgotam-se, com a repetição do procedimento, as folgas existentes inicialmente.

#### 4.4. Conclusão

Neste capítulo, foi proposto um algoritmo para a Melhoria de Segurança Dinâmica, adotando-se ações de controle tipo alteração da tensão das barras externas de geração. Este algoritmo, desenvolvido a partir do cálculo da sensibilidade da margem de segurança, possibilita localizar e quantificar os incrementos de tensão nas máquinas síncronas através de um procedimento de otimização.

Outras alternativas de ações de controle (redespacho de geração, mudança na topologia da rede, corte de carga, emprego de transformadores defasadores, etc. ) não são consideradas, podendo, entretanto, serem desenvolvidas analogamente.

Finalmente, foi discutida a limitação do modelo desenvolvido e proposto um procedimento, o qual está baseado em linearizações sucessivas da margem de segurança. O tamanho do passo para o processo iterativo deve ser tal que o problema não se torne oneroso em termos computacionais e apresente soluções de boa qualidade. Pode-se, ainda, reduzir o número de contingências monitoradas na determinação da solução do problema de Melhoria de Segurança Dinâmica, tornando o esforço de cálculo competitivo do ponto de vista de rapidez e precisão na obtenção dos resultados.



## CAPÍTULO 5

APLICAÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA

## 5.1. Introdução

Neste capítulo, avalia-se a Melhoria de Segurança Dinâmica em dois sistemas de potência de grande porte : o primeiro, composto por 10 máquinas síncronas, baseado na configuração da região Sul do Brasil e o segundo sistema de potência, composto por 25 máquinas síncronas, baseado na configuração da região Sul-Sudeste do Brasil. Efetua-se testes computacionais empregando-se a metodologia proposta neste trabalho.

## 5.2. Sistema de 10 Máquinas

## 5.2.1. Considerações Preliminares

Neste item, apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta na Melhoria de Segurança Dinâmica de um sistema composto por 10 máquinas síncronas, 45 barras e 73 linhas de transmissão, representando o sistema equivalente do sul do Brasil planejado pela ELETROSUL no ano de 1989 em uma situação operativa de carga pesada. O diagrama unifilar, parâmetros e condições operativas pré-falta do sistema são apresentados no Apêndice A, estando os valores dos parâmetros de linhas, transformadores, carga e geração

expressos em pu (por unidade) na base de 100 MVA. As faltas consideradas são do tipo curto-circuito trifásico seguido de perda do equipamento sob falta. O tempo de eliminação de defeito é entendido como sendo o tempo transcorrido entre a detecção do defeito pelo sistema de proteção e a eliminação deste pela atuação dos disjuntores através da retirada da linha ou transformador sob defeito.

A Tabela 1 mostra os resultados do estudo de estabilidade transitória para uma lista de 16 contingências previamente estabelecidas e com os valores das margens de segurança dispostos em ordem crescente. Desta maneira, a contingência no início da lista ordenada representa a contingência mais severa para o sistema, sendo a margem a ela associada denominada margem de segurança do sistema  $M$  (Definição 12). Nesta tabela constam ainda a numeração dessas contingências, a barra sob defeito, barras terminais da linha ou transformador retirado, tempo de eliminação de defeito, tempo crítico e margem de segurança. A abreviação NFE indica que, durante o tempo pré-especificado de simulação das trajetórias no método SLEP, não foi possível encontrar a SLEP com a falta mantida, significando que a referida contingência possui tempo crítico elevado.

A aplicação da metodologia consistirá em se conduzir, caso seja possível, a margem de segurança da contingência mais severa ( $M^p$ ) a um valor considerado seguro para o sistema ( $M_{\min}$ ), monitorando-se adicionalmente as contingências que apresentarem margem de segurança menor que a margem mínima permissível (denominadas contingências em sobrecarga). Para tanto, empregam-se os parâmetros abaixo descritos, conforme critérios adotados anteriormente nas referências [10,32] :

\* Método SLEP

- . Número de termos das séries de Taylor = 6
- . Número máximo de estimativas de tempo crítico = 9
- . Tolerância de convergência do limite superior de energia = 98%
- . Atualização dos coeficientes das séries de Taylor = 0.10 s
- . Intervalo de monitoração da derivada direcional da função energia potencial = 0.05 s
- . Tempo máximo de simulação para cada trajetória = 2.0 s
- . Referência da energia potencial e da derivada direcional da função energia potencial = estado de equilíbrio pós-falta .

\* Análise de Sensibilidade

- . Duração do defeito = 9.0 Ciclos
- . Margem de segurança mínima permissível = 0.3
- . Precisão da margem de segurança =  $\pm 0.05$

\* Algoritmo de Alteração de Tensão das Barras Externas de Geração

- . Limite mínimo de tensão = 0.950 pu
- . Limite máximo de tensão = 1.050 pu
- . Incremento máximo de tensão terminal por iteração = 0.020 pu

Utilizando-se a equação (2.2.4.1), pode-se dizer que a adoção de  $M_{\min}$  igual a 0.3 representa limitar-se o valor da energia total de eliminação de defeito em 70% da energia total crítica do sistema, o que representa uma margem de segurança aceitável para estudos de estabilidade transitória através do Método Direto de Liapunov, segundo a referência [32].

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
3	374	374 S.Osório-230	375 Areia-230	7.8	-0.389
2	374	374 S.Osório-230	371 Xanxerê-230	10.2	0.141
4	374	374 S.Osório-230	433 C.Mourão-230	10.8	0.256
15	408	408 Itaúba-230	414 V.Aires-230	11.4	0.417
14	391	391 S.Santia-525	398 Segredo-525	18.6	0.814
1	370	370 P.Fundo-230	368 Farroupi-230	21.0	0.875
12	391	391 S.Santia-525	343 Ivaiporã-525	22.2	0.900
13	391	391 S.Santia-525	389 C.Novos-525	22.2	0.909
8	382	382 Areia-525	386 Itá-525	22.8	0.910
9	382	382 Areia-525	398 Segredo-525	26.4	0.940
5	382	382 Areia-525	343 Ivaiporã-525	27.0	0.942
7	382	382 Areia-525	384 C.Largo-525	27.0	0.944
6	382	382 Areia-525	383 Curitiba-525	27.0	0.945
10	386	386 Itá-525	387 Gravataí-525	33.0	0.981
11	388	388 V.Aires-525	389 C.Novos-525	NFE	NFE
16	414	414 V.Aires-230	408 Itaúba-230	NFE	NFE

Tabela 1. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 10 Máquinas - Caso Base

### 5.2.2. Processo Iterativo de Melhoria de Segurança Dinâmica

Na Tabela 1 observa-se que a contingência 3 é instável (margem negativa), sendo que as contingências 2 e 4 têm margens de segurança menores que a margem mínima permissível ( $M_{\min}$ ). Desta forma, o conjunto inicial de contingências a serem monitoradas será composto pelas três primeiras contingências da Tabela 1 (contingências 3, 2 e 4), procurando-se melhorar a margem da contingência mais severa (contingência 3).

Na Tabela 2, apresenta-se o vetor de sensibilidade da margem de segurança para as contingências monitoradas, bem como a alteração de tensão necessária para a Melhoria de Segurança Dinâmica da contingência 3 no primeiro passo do processo iterativo.

Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão				
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga			Mudança de Tensão ( pu )
	3	2	4	
366	-0.50086	-0.37686	-0.25397	-0.003
369	-0.66610	-0.25110	-0.36970	-0.004
373	3.62584	2.25370	2.07002	0.020
381	-0.88915	-0.82054	-0.56659	-0.005
390	-0.36023	-0.20946	-0.14683	-0.002
392	-0.00440	0.00586	0.00390	0.000
394	-0.06856	-0.02290	-0.02875	0.000
395	-0.17727	-0.09439	-0.09676	-0.001
397	-0.19332	-0.00595	-0.18891	-0.001
407	-0.41381	-0.22324	-0.22521	-0.002

Tabela 2. Sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão e incremento de tensão - Sistema 10 Máquinas - Caso Base

As Tabelas 3 a 12, colocadas a partir da página 79, ilustram o prosseguimento do processo iterativo de Melhoria de Segurança Dinâmica. Na Tabela 4, após a primeira alteração de tensão, nota-se que o conjunto monitorado é reduzido a 2 contingências e, após nova alteração de tensão, reduzido a apenas uma contingência, como mostrado na Tabela 6. Isto mostra que, apesar de se maximizar apenas a margem de segurança da pior contingência, as outras contingências em sobrecarga também têm suas margens melhoradas. Portanto, o procedimento simplificado de otimização da margem proposto pelo trabalho, apresentou resultados coerentes com os objetivos da metodologia, para este sistema em particular.

O asterisco nas Tabelas 8 e 11 indica que o limite máximo ou mínimo de tensão terminal da barra de geração foi atingido, ficando limitada a tensão a esse patamar nesta barra específica.

O processo iterativo é encerrado quando deteta-se que a margem de segurança atinge um valor dentro da precisão aceitável para estes testes ( $0.3 \pm 0.05$ ).

Na Tabela 12 nota-se que, apesar de ser positiva e dentro de uma faixa de precisão aceitável, a margem desejada (0.3) não foi atingida, ficando limitada a 0.260. Isto deve-se ao fato da tensão da barra 373 ter atingido seu valor máximo (1.050 pu) na Alteração 3 e o incremento de tensão nas barras de geração restantes não contribuir consideravelmente para a Melhoria de Segurança Dinâmica, o que equivale a dizer que as tensões das outras barras são pouco sensíveis à margem de segurança. Contudo, para efeito de ilustração da

influência de determinadas tensões de barras externas de geração na margem de segurança global, se admitir-se um limite máximo de tensão um pouco maior (1.060 pu) nas barras que apresentarem valores expressivos de sensibilidade (neste caso, a barra 373), ter-se-á a margem melhorada para 0.338 após a Alteração 3, como pode ser visto na Tabela 9, encerrando o processo iterativo com a margem desejada atingida. Entretanto, decorrente da adoção de limites maiores de tensão nesta barra externa de geração, ocorrerão violações de tensão nos limites operativos do sistema, o que deve ser evitado durante o funcionamento normal do sistema em regime permanente. Desta forma, o uso de ações de controle com o intuito de se preservar determinada margem de segurança para o sistema, levaria a uma degradação dos níveis de tensão na situação pré-falta.

A Figura 5 mostra a evolução da margem de segurança da contingência mais severa no decorrer do processo iterativo. A Figura 6 mostra o ganho de margem de segurança em cada nova iteração e a Figura 7 a melhoria do tempo crítico desta contingência. Observa-se que, mesmo com novas alterações de tensão, o ganho de margem de segurança torna-se pouco expressivo, às vezes até apresentando comportamento oscilatório, à medida que as tensões terminais das máquinas que mais afetam a margem são limitadas pelos patamares máximos ou mínimos. Uma maior flexibilidade nesses patamares de tensão, levaria a ganhos mais expressivos da margem de segurança.

Na Figura 8 é mostrada a evolução temporal dos ângulos das máquinas síncronas na ocorrência da contingência considerada mais severa pelo SLEP (contingência 3) antes de se efetuar a Melhoria de

Segurança Dinâmica. Tais curvas são obtidas através de simulação numérica pelo programa TRANSDIR, o qual realiza a integração numérica das equações diferenciais que descrevem a dinâmica do sistema.

Ressalta-se que, neste trabalho, a simulação através do TRANSDIR é empregada como um padrão de referência para os estudos de estabilidade transitória, estando as máquinas representadas pelo modelo clássico (modelo I do IEEE).

Observa-se na Figura 8 que a máquina 373 perde sincronismo em relação às outras máquinas, caracterizando a instabilidade transitória do sistema para aquela contingência, coincidindo este diagnóstico com o fornecido pelo método SLEP.

Na Figura 9 é mostrada a evolução dos ângulos das máquinas síncronas na ocorrência da contingência 3 após a Melhoria de Segurança Dinâmica através da metodologia proposta. Observa-se que o sistema agora se apresenta estável para a contingência considerada mais severa, confirmando a indicação do método SLEP e a eficácia da metodologia proposta.



Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
3	374	374 S.Osório-230	375 Areia-230	8.4	-0.186
2	374	374 S.Osório-230	371 Xanxerê-230	10.2	0.252
15	408	408 Itaúba-230	414 V.Aires-230	11.4	0.347
4	374	374 S.Osório-230	433 C.Mourão-230	11.4	0.354
14	391	391 S.Santia-525	398 Segredo-525	17.4	0.797
1	370	370 P.Fundo-230	368 Farroupi-230	21.0	0.874
8	382	382 Areia-525	386 Itá-525	21.0	0.893
12	391	391 S.Santia-525	343 Ivaipora-525	22.2	0.898
13	391	382 S.Santia-525	389 C.Novos-525	21.6	0.902
5	382	382 Areia-525	343 Ivaipora-525	27.0	0.939
9	382	382 Areia-525	398 Segredo-525	27.0	0.941
7	382	382 Areia-525	384 C.Largo-525	27.6	0.946
6	382	382 Areia-525	383 Curitiba-525	27.6	0.947
10	386	386 Itá-525	387 Gravataí-525	33.0	0.980
11	388	388 V.Aires-525	389 C.Novos-525	NFE	NFE
16	414	414 V.Aires-230	408 Itaúba-230	NFE	NFE

Tabela 3. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 10 Máquinas - Alteração 1

Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão				
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga			Mudança de Tensão ( pu )
	3	2	4	
366	-0.43044	-0.30961	-	-0.003
369	-0.56953	-0.19864	-	-0.004
373	3.10510	1.76528	-	0.020
381	-0.78140	-0.66166	-	-0.005
390	-0.31479	-0.16720	-	-0.002
392	-0.00181	0.00538	-	0.000
394	-0.05532	-0.01862	-	0.000
395	-0.15128	-0.07726	-	-0.001
397	-0.16123	0.00741	-	-0.001
407	-0.35848	-0.18014	-	-0.002

Tabela 4. Sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão e incremento de tensão - Sistema 10 Máquinas - Alteração 1

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
3	374	374 S.Osório-230	375 Areia-230	10.2	0.140
15	408	408 Itaúba-230	414 V.Aires-230	11.4	0.342
2	374	374 S.Osório-230	371 Xanxerê-230	10.8	0.351
4	374	374 S.Osório-230	433 C.Mourão-230	12.0	0.429
14	391	391 S.Santia-525	398 Segredo-525	18.0	0.799
1	370	370 P.Fundo-230	368 Farroupi-230	20.4	0.873
8	382	382 Areia-525	386 Itá-525	20.4	0.883
13	391	391 S.Santia-525	389 C.Novos-525	21.0	0.900
12	391	391 S.Santia-525	343 Ivaiporã-525	22.8	0.900
5	382	382 Areia-525	343 Ivaiporã-525	27.0	0.939
9	382	382 Areia-525	398 Segredo-525	26.4	0.939
7	382	382 Areia-525	384 C.Largo-525	27.0	0.943
6	382	382 Areia-525	383 Curitiba-525	27.0	0.944
10	386	386 Itá-525	387 Gravataí-525	33.0	0.981
11	388	388 V.Aires-525	389 C.Novos-525	NFE	NFE
16	414	414 V.Aires-230	408 Itaúba-230	NFE	NFE

Tabela 5. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 10 Máquinas - Alteração 2

Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão				
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga			Mudança de Tensão ( pu )
	3	2	4	
366	-0.37867	-	-	-0.003
369	-0.45701	-	-	-0.004
373	2.23583	-	-	0.020
381	-0.64151	-	-	-0.006
390	-0.24637	-	-	-0.002
392	0.00655	-	-	0.000
394	-0.02065	-	-	0.000
395	-0.09592	-	-	-0.001
397	0.03869	-	-	0.000
407	-0.28597	-	-	-0.003

Tabela 6. Sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão e incremento de tensão - Sistema 10 Máquinas - Alteração 2

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
3	374	374 S.Osório-230	375 Areia-230	10.2	0.244
15	408	408 Itaúba-230	414 V.Aires-230	10.8	0.340
4	374	374 S.Osório-230	433 C.Mourão-230	11.4	0.423
2	374	374 S.Osório-230	371 Xanxerê-230	11.4	0.425
14	391	391 S.Santia-525	398 Segredo-525	17.4	0.796
1	370	370 P.Fundo-230	368 Farroupi-230	20.4	0.864
8	382	382 Areia-525	386 Itá-525	21.0	0.885
12	391	391 S.Santia-525	343 Ivaiporã-525	21.6	0.892
13	391	391 S.Santia-525	389 C.Novos-525	21.0	0.893
9	382	382 Areia-525	398 Segredo-525	25.8	0.936
7	382	382 Areia-525	384 C.Largo-525	26.4	0.942
5	382	382 Areia-525	343 Ivaiporã-525	27.0	0.942
6	382	382 Areia-525	383 Curitiba-525	27.0	0.943
10	386	386 Itá-525	387 Gravataí-525	32.4	0.979
11	388	388 V.Aires-525	389 C.Novos-525	NFE	NFE
16	414	414 V.Aires-230	408 Itaúba-230	NFE	NFE

Tabela 7. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 10 Máquinas - Alteração 3

Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão				
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga			Mudança de Tensão ( pu )
	3	2	4	
366	-0.31282	-	-	-0.004
369	-0.36782	-	-	-0.004
373	1.78411	-	-	0.010 (*)
381	-0.53104	-	-	-0.006
390	-0.19989	-	-	-0.002
392	0.00600	-	-	0.000
394	-0.01678	-	-	0.000
395	-0.07901	-	-	-0.001
397	0.04666	-	-	0.001
407	-0.23205	-	-	-0.003

Tabela 8. Sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão e incremento de tensão - Sistema 10 Máquinas - Alteração 3

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
15	408	408 Itaúba-230	414 V.Aires-230	10.8	0.338
3	374	374 S.Osório-230	375 Areia-230	11.4	0.353
2	374	374 S.Osório-230	371 Xanxerê-230	12.0	0.496
4	374	374 S.Osório-230	433 C.Mourão-230	12.6	0.507
14	391	391 S.Santia-525	398 Segredo-525	18.0	0.798
1	370	370 P.Fundo-230	368 Farroupi-230	19.8	0.862
8	382	382 Areia-525	386 Itá-525	19.8	0.872
13	391	391 S.Santia-525	389 C.Novos-525	20.4	0.891
12	391	391 S.Santia-525	343 Ivaipora-525	22.2	0.895
9	382	382 Areia-525	398 Segredo-525	26.4	0.937
5	382	382 Areia-525	343 Ivaipora-525	27.0	0.939
7	382	382 Areia-525	384 C.Largo-525	27.0	0.942
6	382	382 Areia-525	383 Curitiba-525	27.0	0.943
10	386	386 Itá-525	387 Gravataí-525	33.0	0.979
11	388	388 V.Aires-525	389 C.Novos-525	NFE	NFE
16	414	414 V.Aires-230	408 Itaúba-230	NFE	NFE

Tabela 9. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 10 Máquinas - Alteração 4 - com violação de tensão na barra 373

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)							
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança		
		Barra Origem	Barra Destino				
3	374	374	S.Osório-230	375	Areia-230	10.2	0.240
15	408	408	Itaúba-230	414	V.Aires-230	10.8	0.336
4	374	374	S.Osório-230	433	C.Mourão-230	12.0	0.493
2	374	374	S.Osório-230	371	Xanxere-230	12.0	0.495
14	391	391	S.Santia-525	398	Segredo-525	18.0	0.799
1	370	370	P.Fundo-230	368	Farroupi-230	19.8	0.862
8	382	382	Areia-525	386	Itá-525	20.4	0.882
13	391	391	S.Santia-525	389	C.Novos-525	20.4	0.891
12	391	391	S.Santia-525	343	Ivaipora-525	22.2	0.894
5	382	382	Areia-525	343	Ivaipora-525	26.4	0.938
9	382	382	Areia-525	398	Segredo-525	26.4	0.940
7	382	382	Areia-525	384	C.Largo-525	26.4	0.942
6	382	382	Areia-525	383	Curitiba-525	26.4	0.943
10	386	386	Itá-525	387	Gravataí-525	32.4	0.979
11	388	388	V.Aires-525	389	C.Novos-525	NFE	NFE
16	414	414	V.Aires-230	408	Itaúba-230	NFE	NFE

Tabela 10. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 10 Máquinas - Alteração 4 - sem violação de tensão na barra 373



Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação a Tensão				
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga			Mudança de Tensão ( pu )
	3	2	4	
366	-0.31612	-	-	-0.004
369	-0.36588	-	-	-0.004
373	1.80349	-	-	0.000 (*)
381	-0.54522	-	-	-0.006
390	-0.20364	-	-	-0.002
392	0.00614	-	-	0.000
394	-0.01672	-	-	0.000
395	-0.07993	-	-	-0.001
397	0.05277	-	-	0.001
407	-0.23361	-	-	-0.003

Tabela 11. Sensibilidade da margem de segurança em relação a tensão e incremento de tensão - Sistema 10 Máquinas - Alteração 4 sem violação de tensão na barra 373

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
3	374	374 S.Osório-230	375 Areia-230	10.8	0.260
15	408	408 Itaúba-230	414 V.Aires-230	11.4	0.345
4	374	374 S.Osório-230	433 C.Mourão-230	12.0	0.490
2	374	374 S.Osório-230	371 Xanxerê-230	12.0	0.492
14	391	391 S.Santia-525	398 Segredo-525	18.0	0.799
1	370	370 P.Fundo-230	368 Farroupi-230	19.8	0.860
8	382	382 Areia-525	386 Itá-525	21.0	0.890
12	391	391 S.Santia-525	343 Ivaiporã-525	21.6	0.892
13	391	391 S.Santia-525	389 C.Novos-525	21.0	0.892
9	382	382 Areia-525	398 Segredo-525	26.4	0.941
7	382	382 Areia-525	384 C.Largo-525	26.4	0.942
5	382	382 Areia-525	343 Ivaiporã-525	27.6	0.942
6	382	382 Areia-525	383 Curitiba-525	26.4	0.942
10	386	386 Itá-525	387 Gravataí-525	32.4	0.979
11	388	388 V.Aires-525	389 C.Novos-525	NFE	NFE
16	414	414 V.Aires-230	408 Itaúba-230	NFE	NFE

Tabela 12. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 10 Máquinas - Alteração 5 - sem violação de tensão na barra 373

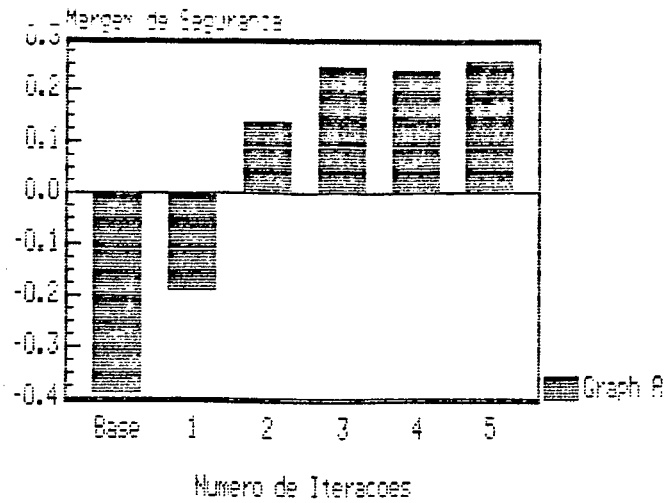


Figura 5. Melhoria da margem de segurança - Sistema 10 Máquinas

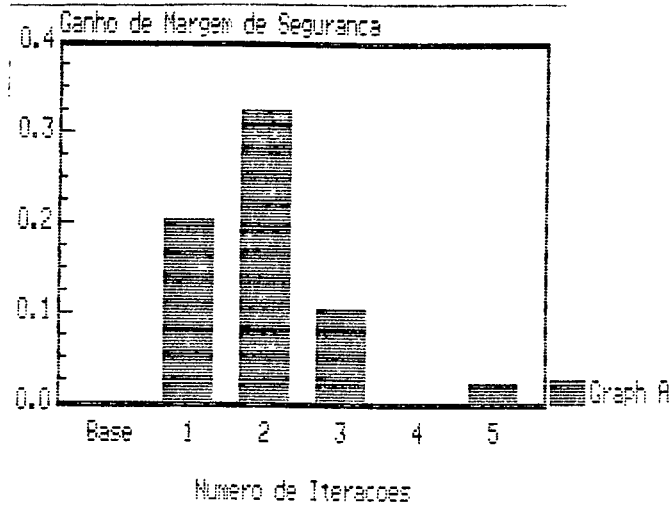


Figura 6. Ganho de margem de segurança - Sistema 10 Máquinas

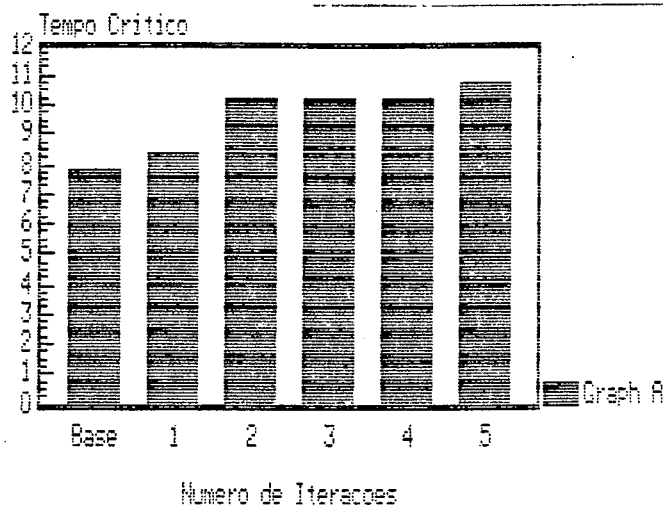


Figura 7. Melhoria do tempo critico da pior contingencia- Sistema 10 Máquinas



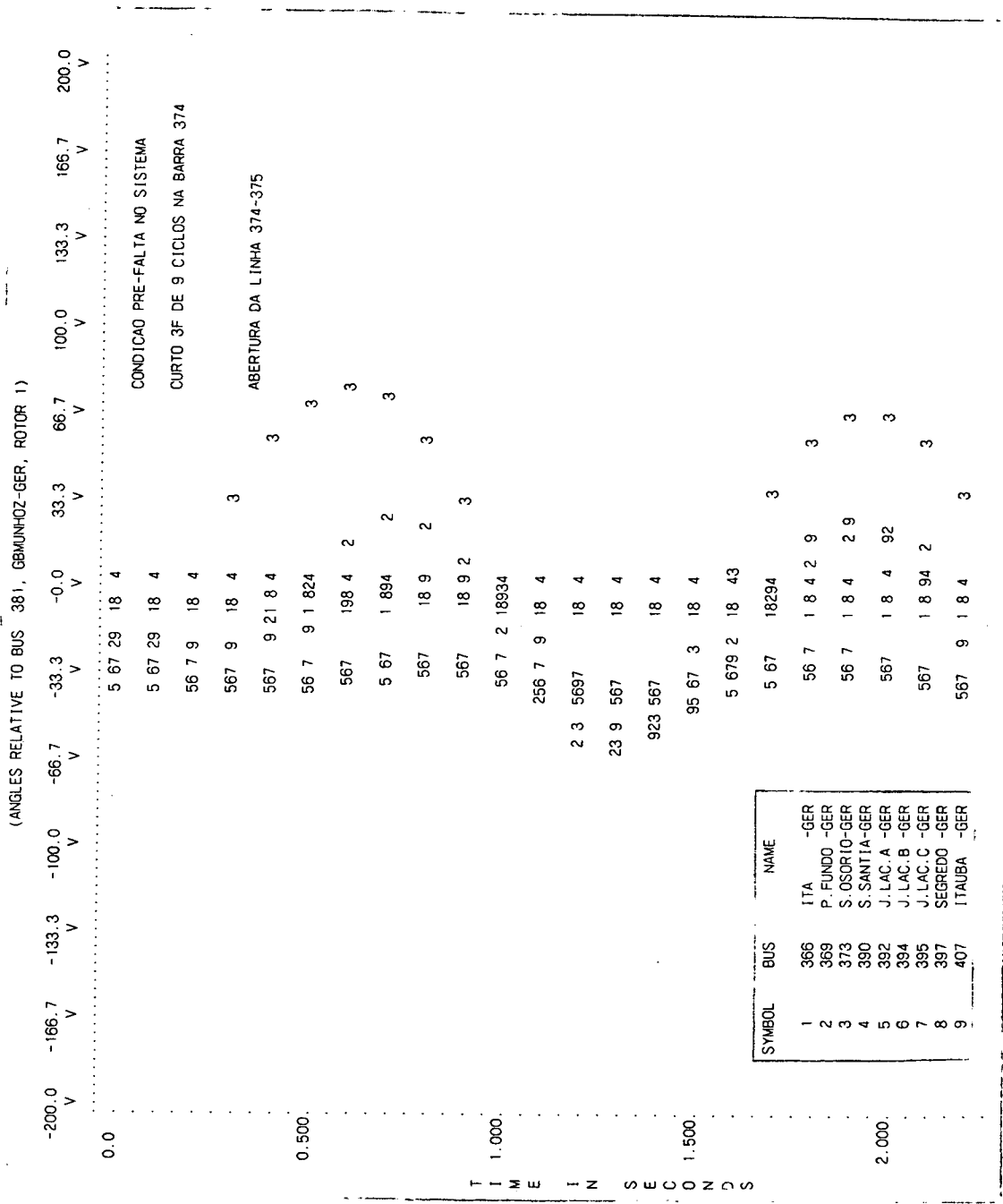


Figura 9. Evolução temporal das posições angulares das máquinas síncronas - Sistema 10 Máquinas - Caso Alterado - Estável

### 5.2.3. Análise de Resultados

Os resultados acima apresentados ilustram que, empregando-se a metodologia proposta, é possível encontrar-se um novo ponto de operação pós-falta para o sistema de 10 máquinas sob análise, de tal maneira que o sistema seja estável para a lista de contingências especificada. Entretanto, por restrições de tensão do sistema, não foi possível atingir plenamente a margem de segurança desejada.

Nota-se, pelas Figuras 5 e 7, que a melhoria da margem de segurança foi de 167 % e do tempo crítico em torno de 38 %, o que evidencia a influência significativa da alteração de tensão na estabilidade transitória.

Como a faixa de variação de tensão nas barras de um sistema de potência é muito reduzida, se comparada com outras ações de controle como o redespacho de geração, são também limitados os resultados que se pode obter na Melhoria de Segurança Dinâmica de sistemas elétricos de potência através da alteração de tensão nas máquinas síncronas. Não se deve esquecer, entretanto, que essa alteração de tensão não afeta significativamente o ponto de operação do sistema, bem como o despacho adotado nas usinas. Isto pode ser fundamental quando condições hidrológicas e níveis de segurança devem ser satisfeitos simultaneamente.

### 5.3. Sistema de 25 Máquinas

#### 5.3.1. Considerações Preliminares

Neste item analogamente aos testes efetuados com o sistema de 10 máquinas, aplica-se a metodologia proposta na Melhoria de Segurança Dinâmica do sistema Sul-Sudeste simplificado com configuração prevista para o ano de 1992, operando numa situação crítica de regime de carga pesada. Este sistema é composto por 25 máquinas síncronas, 496 barras, 1011 linhas de transmissão e 181 transformadores. Os parâmetros e condições operativas na situação pré-falta estão armazenados em unidades de discos na UFSC, não sendo reproduzidos no trabalho. São consideradas faltas do tipo curto-circuito trifásico seguido de perda do equipamento associado à falta. Destaca-se que, para efeito de análise de estabilidade transitória, o tempo de permanência de defeito empregado (6.0 ciclos) é um pouco superior ao adotado nos critérios do GCPS (Grupo Coordenador de Planejamento de Sistemas Elétricos) da ELETROBRAS.

Os resultados da análise de estabilidade transitória para uma lista previamente estabelecida composta por 18 contingências são mostrados na Tabela 13, para a qual valem os mesmos comentários já feitos no item 5.2.1.. Observa-se, nesta tabela, a existência de duas contingências instáveis (contingências 5 e 4), para as quais deverá ser aplicada a metodologia proposta. Sendo a margem do sistema  $M$  igual a  $-0.571$ , dever-se-á conduzir essa margem a um valor considerado seguro ( $M_{\min}=0.5$ ), monitorando-se adicionalmente a margem da contingência 4. Para a aplicação do método SLEP, modelo de

sensibilidade e alteração de tensão, empregam-se os mesmos parâmetros e critérios utilizados nos testes do sistema de 10 máquinas, porém empregando-se incrementos de tensão na ordem de 3% para efeito de teste e admitindo  $\mu_{\min} = 0.5$ . A duração de defeito, como já dito, é de 6.0 ciclos.

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
5	66	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	5.4	-0.571
4	81	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	6.0	-0.009
6	84	84 Iv/It1-750	76 Itaberá-750	12.0	0.764
13	393	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	13.2	0.814
14	393	393 F.Areia-525	391 Curitiba-525	13.2	0.822
10	420	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	13.8	0.836
18	393	393 F.Areia-525	416 Segredo-525	13.8	0.839
15	393	393 F.Areia-525	389 C.Novos-525	14.4	0.840
9	399	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	15.0	0.853
16	420	420 Santiago-525	398 Itá-525	15.0	0.871
17	420	420 Santiago-525	416 Segredo-525	15.6	0.871
11	399	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	16.8	0.875
12	399	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	16.8	0.884
7	76	84 Iv/It1-750	76 Itaberá-750	18.0	0.896
1	91	138 A.Verme.-500	91 Marimb.-500	21.6	0.947
8	410	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	48.6	0.977
2	137	137 Assis-440	139 Baurú-440	44.4	0.978
3	46	46 Adrian.-500	64 C.Paul.-500	NFE	NFE

Tabela 13. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 25 Máquinas - Caso Base



### 5.3.2. Processo Iterativo de Melhoria de Segurança Dinâmica

Na Tabela 13, conforme comentado acima, observa-se que as contingências 5 e 4 são consideradas instáveis pelo método SLEP. Desta forma, o conjunto inicial de contingências a serem monitoradas é composto por essas duas contingências e procurar-se-á melhorar a margem de segurança da contingência mais severa dentre as 18 analisadas (contingência 5).

Com as indicações do vetor de sensibilidade da margem de segurança e os incrementos de tensão necessários para a melhoria da margem contidas na Tabela 14, efetua-se a primeira alteração de tensão nas máquinas síncronas. O resultado dessa ação de controle é mostrado na Tabela 15, onde nota-se que a margem do sistema, embora ainda inadequada, foi melhorada para 0.005 em apenas uma alteração de tensão.

Com o prosseguimento do processo iterativo, ilustrado nas Tabelas 16 a 25, nota-se que, após a Alteração 2, tem-se apenas a contingência 5 sendo monitorada, já que a contingência 4 apresenta margem igual a 0.501. Isto comprova novamente a eficiência do algoritmo que procura melhorar a margem da contingência mais severa, influenciando inclusive outras contingências em sobrecarga.

Tem-se, ao final do procedimento iterativo de Melhoria de Segurança Dinâmica, a margem do sistema melhorada para 0.510, satisfazendo o valor desejado de margem de segurança para o sistema.

A Figura 10, mostra o comportamento da margem de segurança ao longo do processo iterativo. Pode-se notar, através da Figura 11, que o ganho de margem é muito acentuado neste caso, exceto na correção 1. Isto advém do fato de serem os incrementos de tensão insuficientes para melhorar de forma significativa a margem naquela iteração. A Figura 12, mostra a melhoria ocorrida com o tempo crítico da contingência mais severa.

Na Figura 13, é mostrada a evolução dos ângulos das máquinas síncronas na ocorrência da contingência considerada mais severa pelo SLEP (contingência 5) antes de se efetuar a melhoria da margem de segurança pela metodologia proposta. Analisando-se essas curvas geradas pelo programa TRASNSDIR, nota-se que várias máquinas perdem o sincronismo em relação ao restante do sistema (caso instável).

Na Figura 14, é mostrada a evolução dos ângulos das máquinas síncronas após a aplicação da metodologia proposta. Observa-se que o sistema apresenta agora um comportamento estável na ocorrência da contingência 5, comprovando a eficiência do algoritmo.

Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão			
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga		Mudança de Tensão ( pu )
	5	4	
12	-1.94554	-1.92406	-0.011
14	-0.26207	-0.29278	-0.001
17	1.77786	-0.01881	0.010
18	-1.49100	-1.48079	-0.008
22	-0.39351	-0.49680	-0.002
26	-0.10710	-0.05541	-0.001
120	-1.64338	-0.83525	-0.009
122	-0.20481	-0.18256	-0.001
124	-3.65555	-0.99240	-0.021
126	-5.26639	-1.54101	-0.030
127	-0.67425	-0.35087	-0.004
128	-0.08509	-0.09464	0.000
162	-1.67483	-1.51491	-0.010
163	-3.65132	-2.91884	-0.021
164	-1.71143	-1.71836	-0.010
165	-2.25504	-1.90627	-0.013
323	0.02123	0.22053	0.000
326	0.13516	0.18448	0.001
367	0.04239	0.00761	0.000
415	-0.02851	-0.03006	0.000
419	-0.10227	-0.05961	-0.001
421	0.20213	0.87604	0.001
489	-0.07811	-0.07545	0.000
562	-3.11706	-1.17655	-0.018
564	-0.08098	-0.06600	0.000

Tabela 14. Sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão e incremento de tensão - Sistema 25 Máquinas - Caso Base

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
5	66	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	6.6	0.005
4	81	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	7.8	0.314
6	84	84 Iv/It1-750	76 Itabera-750	13.2	0.790
13	393	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	13.2	0.815
10	420	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	13.8	0.837
14	393	393 F.Areia-525	391 Curitiba-525	14.4	0.840
18	393	393 F.Areia-525	416 Segredo-525	14.4	0.840
15	393	393 F.Areia-525	389 C.Novos-525	14.4	0.841
9	399	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	15.6	0.865
17	420	420 Santiago-525	416 Segredo-525	15.6	0.872
16	420	420 Santiago-525	398 Ita-525	15.0	0.872
11	399	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	16.8	0.883
12	399	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	17.4	0.891
7	76	84 Iv/It1-750	76 Itabera-750	18.6	0.902
1	91	138 A.Verme.-500	91 Marimb.-500	21.6	0.947
8	410	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	51.0	0.978
2	137	137 Assis-440	139 Bauru-440	44.4	0.978
3	46	46 Adrian.-500	64 C.Paul.-500	NFE	NFE

Tabela 15. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 25 Máquinas - Alteração 1

Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão			
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga		Mudança de Tensão ( pu )
	5	4	
12	-2.07837	-1.00870	-0.011
14	-0.10846	-0.16930	-0.001
17	1.21981	-0.00221	0.007
18	-1.42309	-0.92237	-0.008
22	-0.50399	-0.35626	-0.003
26	-0.07850	-0.00637	0.000
120	-1.49563	-0.48938	-0.008
122	-0.25651	-0.14413	-0.001
124	-3.54745	-1.05751	-0.019
126	-5.50530	-1.15149	-0.030
127	-0.71815	-0.19472	-0.004
128	-0.06200	-0.07530	0.000
162	-1.45839	-1.02912	-0.008
163	-3.94545	-1.60016	-0.021
164	-1.78179	-1.01784	-0.010
165	-2.64148	-1.16081	-0.014
323	0.13009	0.13902	0.001
326	0.11136	0.16955	0.001
367	0.05374	0.06832	0.000
415	0.00968	-0.01884	0.000
419	-0.04500	-0.03749	0.000
421	0.06779	0.58063	0.000
489	-0.04351	-0.05219	0.000
562	-3.29925	-0.46076	-0.018
564	-0.07364	-0.05331	0.000

Tabela 16. Sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão e incremento de tensão - Sistema 25 Máquinas - Alteração 1

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
5	66	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	6.6	0.173
4	81	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	8.4	0.501
6	84	84 Iv/It1-750	76 Itabera-750	13.2	0.807
13	393	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	13.8	0.817
18	393	393 F.Areia-525	416 Segredo-525	14.4	0.841
14	393	393 F.Areia-525	391 Curitiba-525	14.4	0.841
15	393	393 F.Areia-525	389 C.Novos-525	14.4	0.842
10	420	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	14.4	0.853
9	399	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	16.2	0.867
16	420	420 Santiago-525	398 Ita-525	15.6	0.884
17	420	420 Santiago-525	416 Segredo-525	16.2	0.884
12	399	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	17.4	0.892
11	399	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	18.0	0.893
7	76	84 Iv/It1-750	76 Itabera-750	19.8	0.915
1	91	138 A.Verme.-500	91 Marimb.-500	21.6	0.946
8	410	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	52.2	0.978
2	137	137 Assis-440	139 Baur-440	44.4	0.979
3	46	46 Adrian.-500	64 C.Paul.-500	NFE	NFE

Tabela 17. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 25 Máquinas - Alteração 2

Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão			
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga		Mudança de Tensão ( pu )
	5	4	
12	-1.26614	-	-0.012
14	-0.10027	-	-0.001
17	0.78040	-	0.008
18	-0.53660	-	-0.005
22	-0.35675	-	-0.003
26	-0.03089	-	0.000
120	-0.81216	-	-0.008
122	-0.17762	-	-0.002
124	-2.07116	-	-0.020
126	-3.06792	-	-0.030
127	-0.36837	-	-0.004
128	-0.07742	-	-0.001
162	-0.89073	-	-0.009
163	-2.11732	-	-0.021
164	-0.73132	-	-0.007
165	-1.40922	-	-0.014
323	-0.05450	-	-0.001
326	0.05445	-	0.001
367	0.01912	-	0.000
415	-0.03393	-	0.000
419	-0.06172	-	-0.001
421	0.08291	-	0.001
489	-0.04304	-	0.000
562	-1.68138	-	-0.016
564	-0.04827	-	0.000

Tabela 18. Sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão e incremento de tensão - Sistema 25 Máquinas - Alteração 2

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
5	66	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	7.8	0.325
4	81	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	9.6	0.569
6	84	84 Iv/It1-750	76 Itabera-750	14.4	0.826
13	393	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	13.8	0.830
14	393	393 F.Areia-525	391 Curitiba-525	13.8	0.839
18	393	393 F.Areia-525	416 Segredo-525	14.4	0.839
15	393	393 F.Areia-525	389 C.Novos-525	14.4	0.840
10	420	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	15.0	0.854
9	399	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	16.2	0.875
17	420	420 Santiago-525	416 Segredo-525	15.6	0.882
16	420	420 Santiago-525	398 Itá-525	15.6	0.883
11	399	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	18.6	0.899
12	399	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	18.6	0.901
7	76	84 Iv/It1-750	76 Itabera-750	21.0	0.920
1	91	138 A.Verme.-500	91 Marimb.-500	22.2	0.946
2	137	137 Assis-440	139 Baurú-440	45.0	0.979
8	420	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	54.0	0.979
3	46	46 Adrian.-500	64 C.Paul.-500	NFE	NFE

Tabela 19. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 25 Máquinas - Alteração 3



Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação a Tensão			
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga		Mudança de Tensão ( pu )
	5	4	
12	-0.85481	-	-0.007
14	-0.08077	-	-0.001
17	0.71200	-	0.006
18	0.06062	-	0.001
22	-0.27203	-	-0.002
26	-0.01180	-	0.000
120	-0.42150	-	-0.004
122	-0.10717	-	-0.001
124	-2.02827	-	-0.017
126	-3.50271	-	-0.030
127	-0.15793	-	-0.001
128	-0.06486	-	-0.001
162	-0.43586	-	-0.004
163	-1.27294	-	-0.011
164	-0.49880	-	-0.004
165	-0.91484	-	-0.008
323	-0.04709	-	0.000
326	0.05604	-	0.000
367	0.01504	-	0.000
415	-0.03148	-	0.000
419	-0.04852	-	0.000
421	0.08045	-	0.000
489	-0.03518	-	0.001
562	-1.77254	-	-0.015
564	-0.04230	-	0.000

Tabela 20. Sensibilidade da margem de segurança em relação a tensão e incremento de tensão - Sistema 25 Máquinas - Alteração 3

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
5	66	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	8.4	0.431
4	81	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	10.2	0.623
13	393	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	13.8	0.832
15	393	393 F.Areia-525	389 C.Novos-525	13.8	0.836
6	81	81 Iv/It1-750	76 Itabera-750	14.4	0.840
14	393	393 F.Areia-525	391 Curitiba-525	14.4	0.840
18	393	393 F.Areia-525	416 Segredo-525	14.4	0.840
10	420	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	15.0	0.855
17	420	420 Santiago-525	416 Segredo-525	16.2	0.883
16	420	420 Santiago-525	398 Ita-525	16.2	0.884
9	399	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	17.4	0.885
11	399	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	18.6	0.899
12	399	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	18.6	0.904
7	76	84 Iv/It1-750	76 Itabera-750	21.0	0.924
1	91	138 A.Verme.-500	91 Marimb.-500	22.2	0.946
2	137	137 Assis-440	139 Bauru-440	45.6	0.979
8	410	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	56.4	0.979
3	46	46 Adrian.-500	64 C.Paul.-500	NFE	NFE

Tabela 21. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 25 Máquinas - Alteração 4

Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão			
Barra da Máquina	Contingências em Sobrecarga		Mudança de Tensão ( pu )
	5	4	
12	-0.78010	-	-0.015
14	-0.04270	-	-0.001
17	0.60415	-	0.011
18	0.03652	-	0.001
22	-0.21389	-	-0.004
26	-0.01433	-	0.000
120	-0.36408	-	-0.007
122	-0.07108	-	-0.001
124	-0.85600	-	-0.013 (*)
126	-1.57855	-	0.000 (*)
127	-0.10649	-	-0.002
128	-0.05849	-	-0.001
162	-0.32854	-	-0.006
163	-1.20469	-	-0.023
164	-0.42650	-	-0.008
165	-0.82554	-	-0.016
323	-0.03729	-	-0.001
326	0.04914	-	0.001
367	0.01324	-	0.000
415	-0.02433	-	0.000
419	-0.05931	-	-0.001
421	0.06914	-	0.001
489	-0.02856	-	-0.001
562	-0.85911	-	-0.016
564	-0.03104	-	-0.001

Tabela 22. Sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão e incremento de tensão - Sistema 25 Máquinas - Alteração 4

Contingências Sob Análise (Ordenadas Pelo Grau de Severidade)					
No. da Contingência	Barra Sob Falta	Linha de Transmissão Retirada		Tempo Crítico (Ciclos)	Margem de Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		
5	66	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	9.0	0.510
4	81	81 Iv/Foz1-750	66 FozIg-750	11.4	0.707
13	393	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	13.8	0.832
18	393	393 F.Areia-525	416 Segredo-525	13.8	0.836
14	393	393 F.Areia-525	391 Curitiba-525	14.4	0.841
15	393	393 F.Areia-525	389 C.Novos-525	14.4	0.854
10	420	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	15.0	0.855
6	84	84 Iv/It1-750	76 Itaberá-750	16.2	0.867
17	420	420 Santiago-525	416 Segredo-525	15.6	0.882
16	420	420 Santiago-525	398 Itá-525	16.2	0.885
9	399	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	17.4	0.885
11	399	399 Ivaipora-525	420 Santiago-525	18.6	0.905
12	399	399 Ivaipora-525	393 F.Areia-525	19.8	0.912
7	76	84 Iv/It1-750	76 Itaberá-750	22.2	0.931
1	91	138 A.Verme.-500	91 Marimb.-500	21.0	0.941
2	137	137 Assis-440	139 Baurú-440	45.6	0.979
8	410	399 Ivaipora-525	410 Londrina-525	59.4	0.980
3	46	46 Adrian.-500	64 C.Paul.-500	NFE	NFE

Tabela 23. Contingências sob análise ordenadas pelos valores crescentes da margem de segurança - Sistema 25 Máquinas - Alteração 5

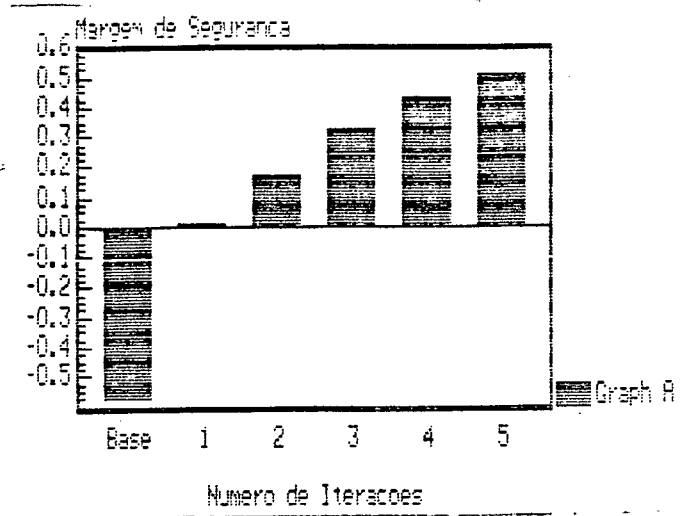


Figura 10. Melhoria da margem de segurança - Sistema 25 Máquinas

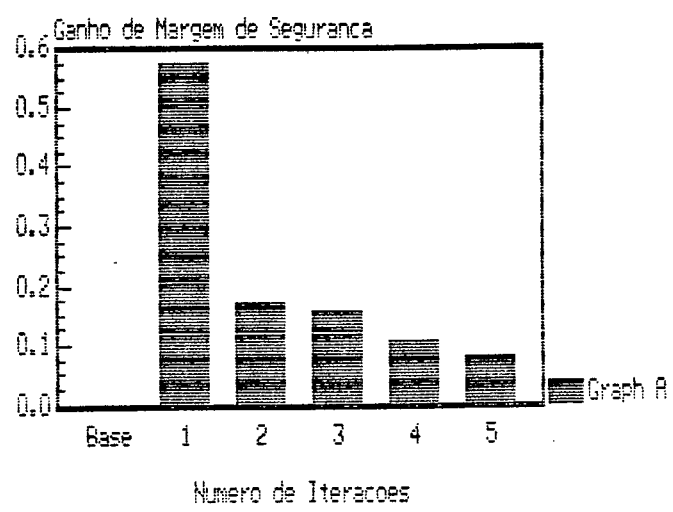


Figura 11. Ganho de margem de segurança - Sistema 25 Máquinas

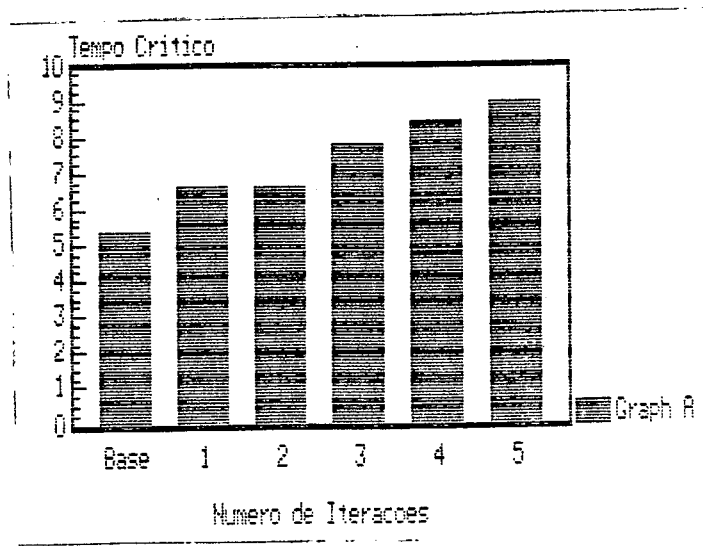


Figura 12. Melhoria do tempo crítico da pior contingência - Sistema 25 Máquinas

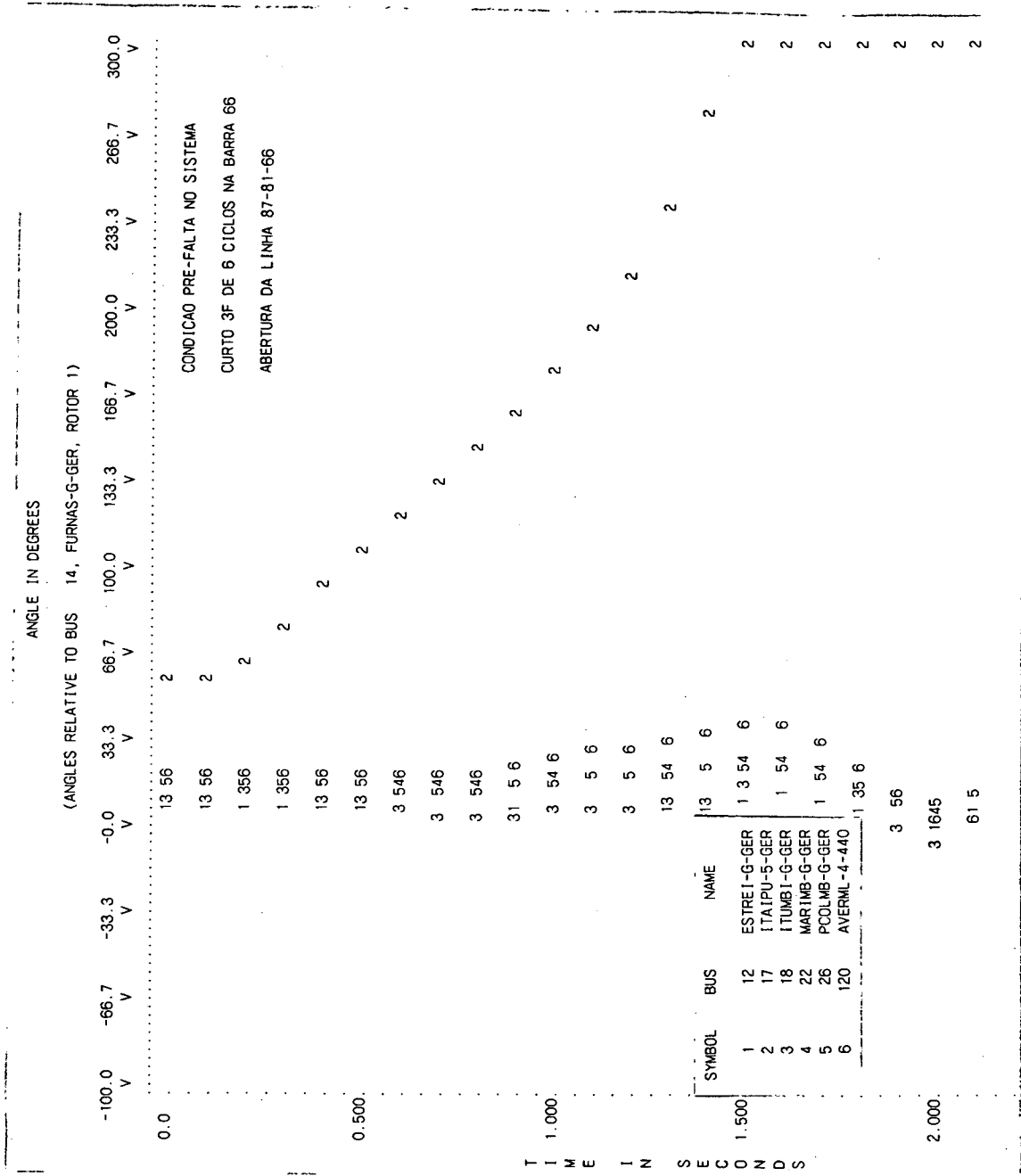


Figura 13. Evoluçao temporal das posicoes angulares das maquinas sincronas - Sistema 25 Maquinas - Caso Base - Instavel

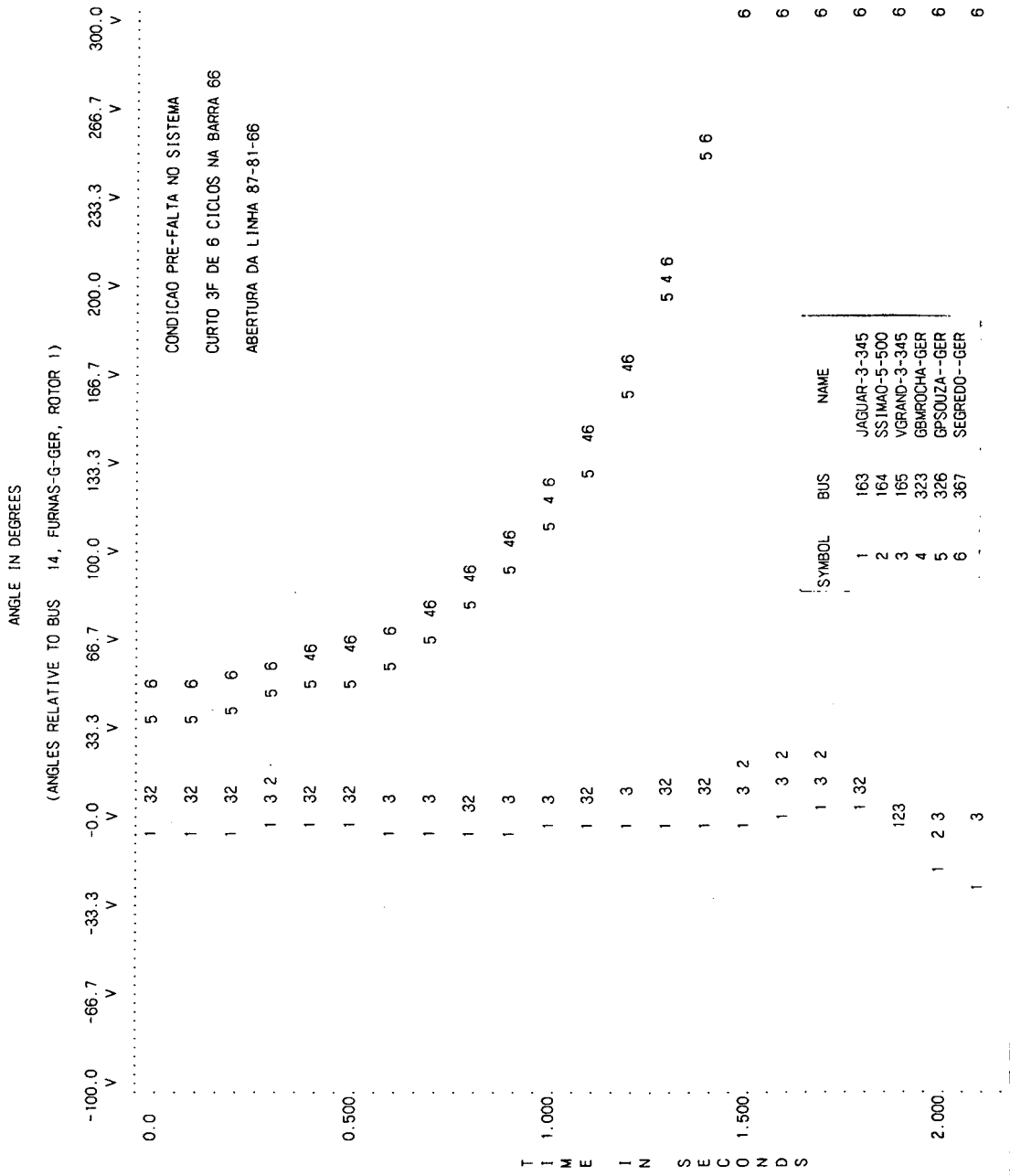


Figura 13. Evolução temporal das posições angulares das máquinas síncronas - Sistema 25 Máquinas - Caso Base - Instável

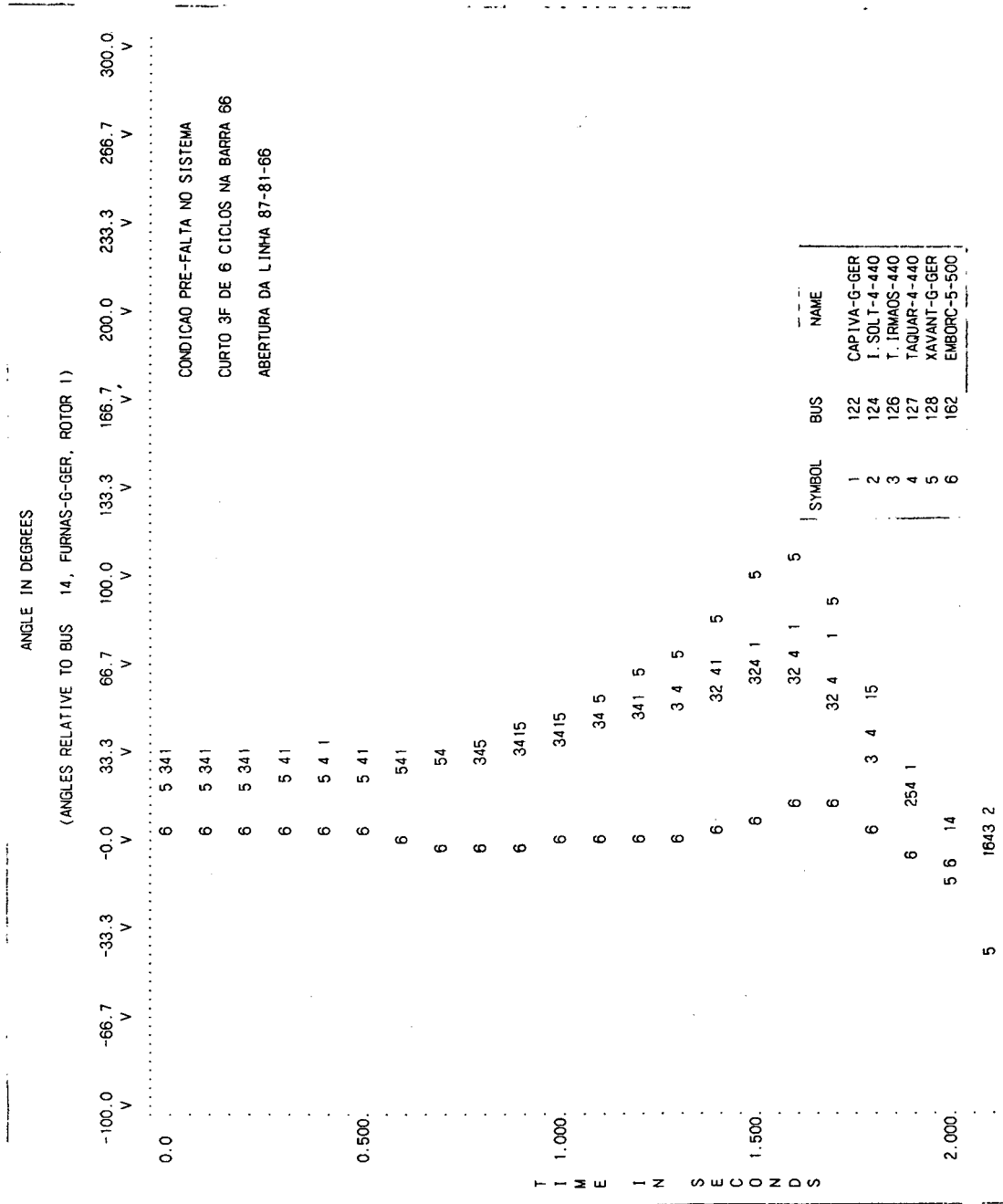


Figura 13. Evoluçao temporal das posiçoes angulares das máquinas síncronas - Sistema 25 Máquinas - Caso Base - Instável



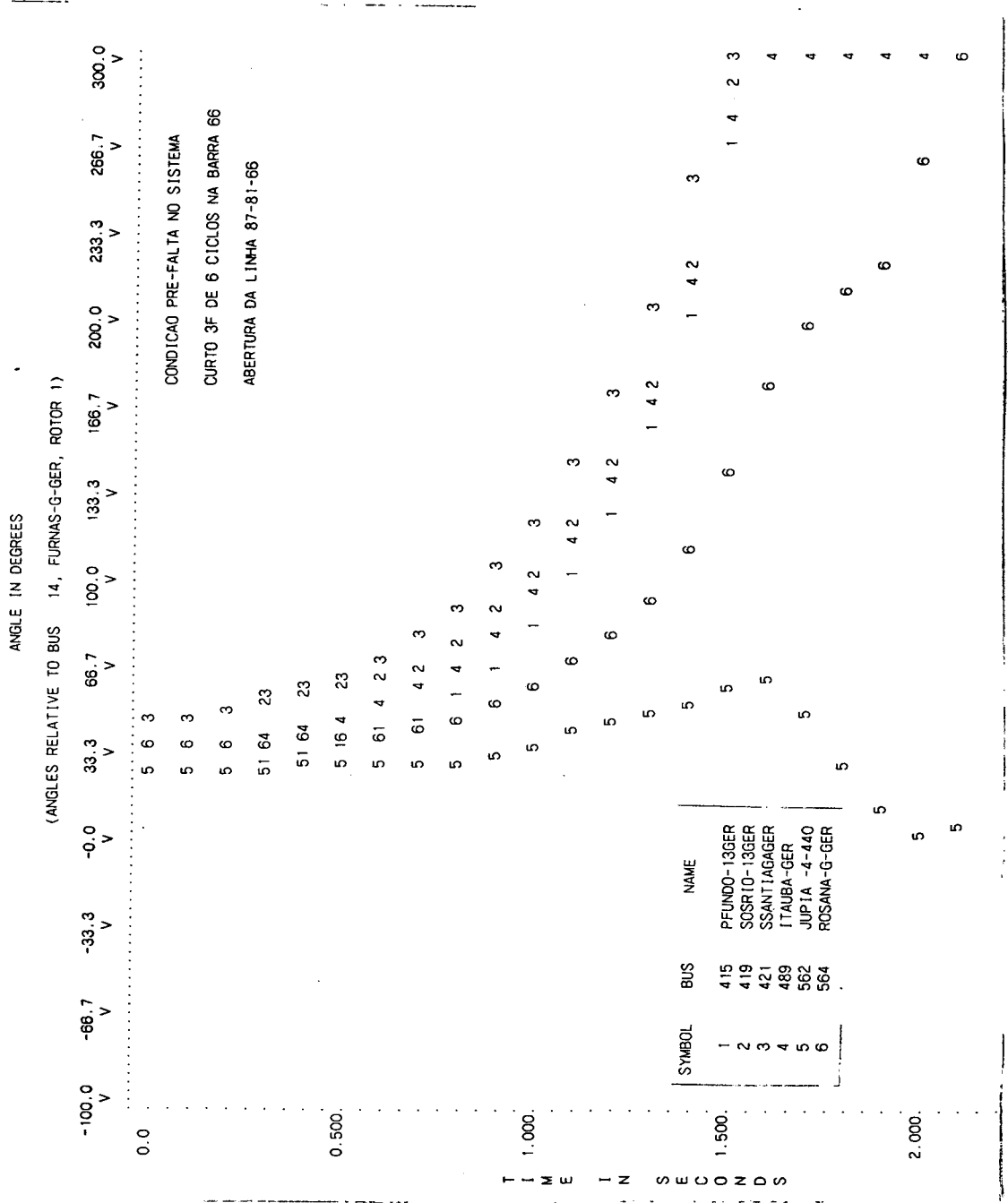


Figura 13. Evoluçao temporal das posicoes angulares das maquinas sincronas - Sistema 25 Maquinas - Caso Base - Instavel

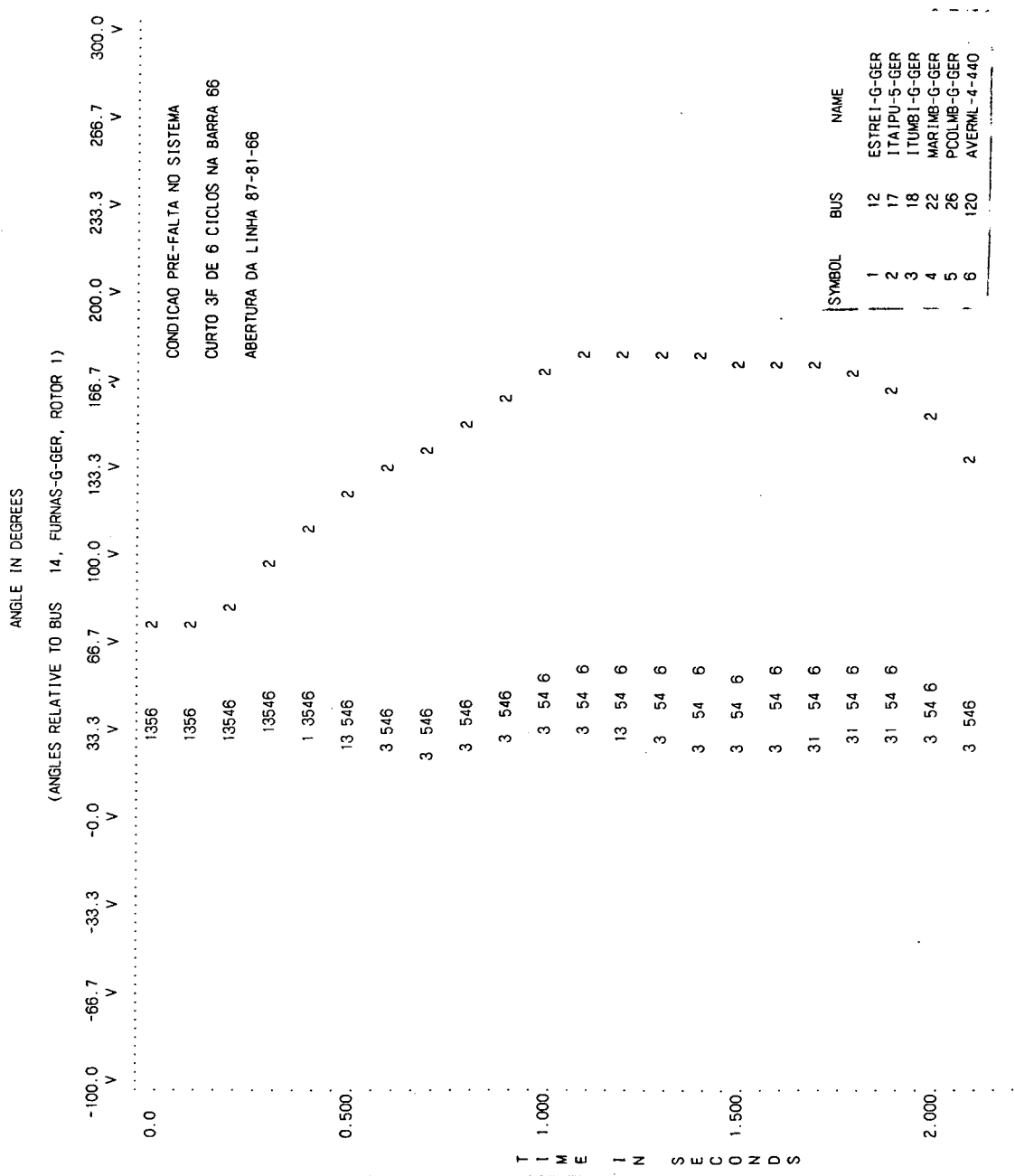


Figura 14. Evolução temporal das posições angulares das máquinas síncronas - Sistema 25 Máquinas - Caso Final - Estável

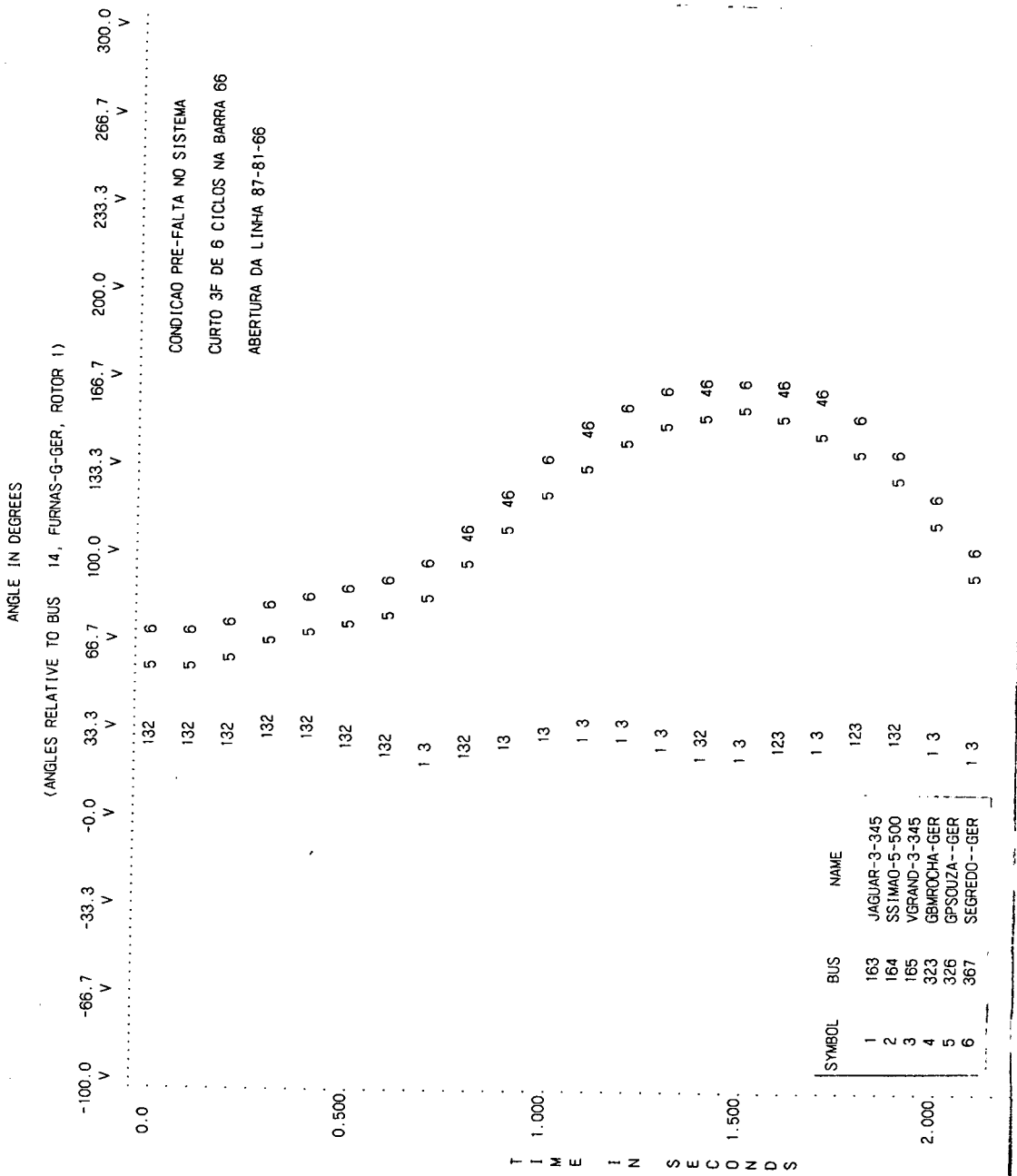


Figura 14. Evoluçao temporal das posiçoes angulares das máquinas síncronas - Sistema 25 Máquinas - Caso Final - Estável

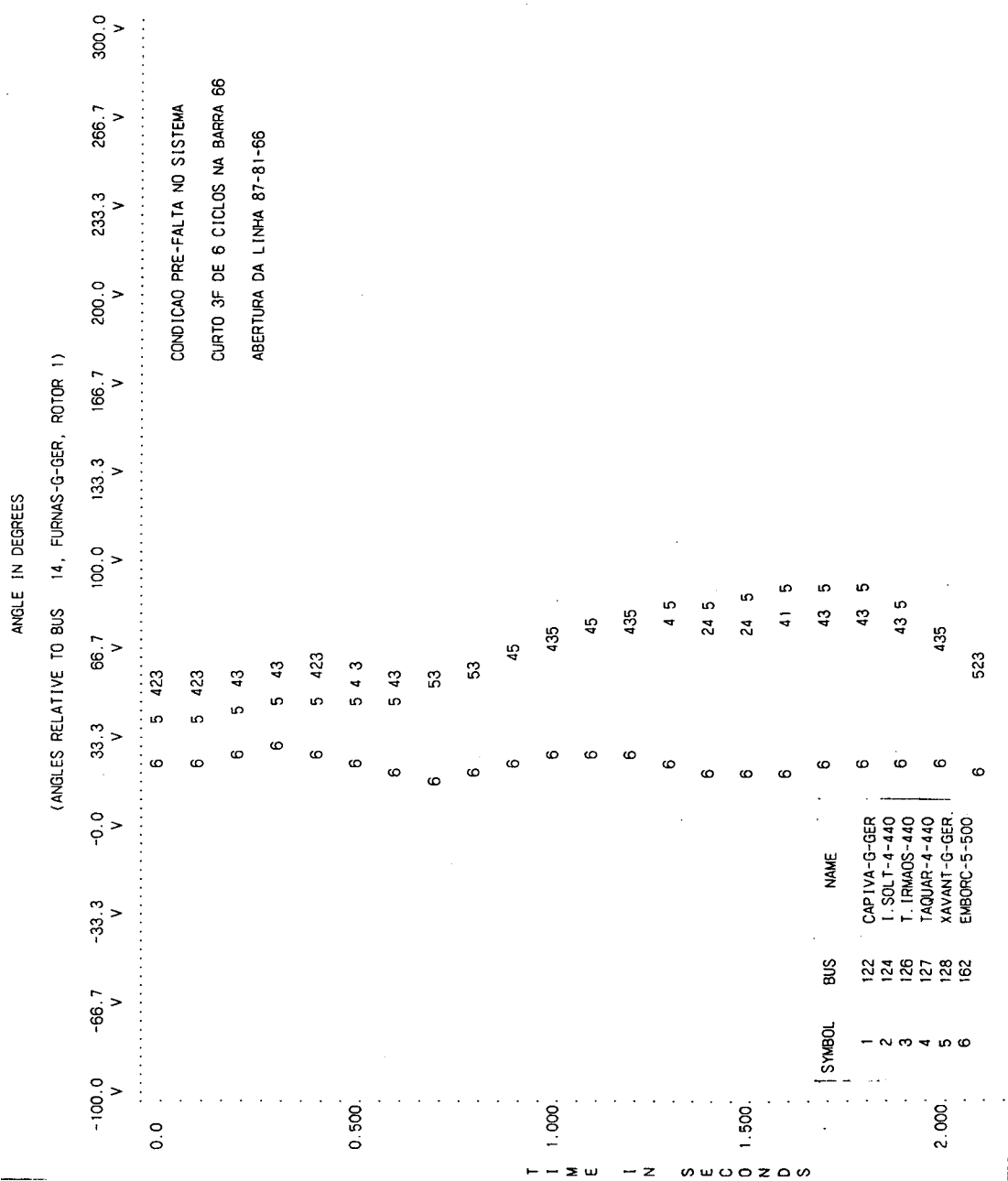


Figura 14. Evolução temporal das posições angulares das máquinas síncronas - Sistema 25 Máquinas - Caso Final - Estável



### 5.3.3. Análise de Resultados

Os resultados obtidos mostram que houve uma melhoria de 131% na margem de segurança e de 63% no tempo crítico da contingência mais severa, ilustrando os bons resultados alcançados com a metodologia na Melhoria de Segurança Dinâmica do sistema de 25 Máquinas.

### 5.4. Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das aplicações da metodologia proposta para Melhoria de Segurança Dinâmica de dois sistemas de potência : um sistema com 10 máquinas baseado na configuração simplificada da região Sul do Brasil no ano de 1989 e o outro sistema de grande porte com 25 máquinas representando a região Sul-Sudeste do Brasil no ano de 1992.

Adotou-se a alteração de tensão nas barras externas de geração como ação de controle para a Melhoria de Segurança Dinâmica. Objetivando-se simplificar o problema de otimização com restrições estáticas e dinâmicas, foi proposto um algoritmo heurístico de alteração de tensão para melhorar a margem de segurança da contingência mais severa. Tal procedimento mostrou-se eficiente nos testes efetuados, comprovando que a melhoria da margem de segurança da contingência mais severa pode conduzir à melhoria da margem das contingências em sobrecarga restantes, como foi o caso nos exemplos apresentados. Tomando-se apenas as contingências em sobrecarga no problema de otimização, pôde-se reduzir a sua dimensão, tornando o cálculo competitivo do ponto de vista de rapidez e sem prejudicar a

precisão dos resultados.

Os resultados da aplicação da metodologia nos dois sistemas sob análise, mostraram ser a alteração de tensão nas barras externas de geração uma eficiente ação de controle na Melhoria de Segurança Dinâmica.

## CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

## 6.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para a Melhoria de Segurança Dinâmica em sistemas elétricos de potência considerando-se a estabilidade transitória para faltas tipo curto-circuito trifásico seguido de perda de equipamento e empregando-se ações de controle baseados na alteração de tensão das barras externas de geração.

A análise de estabilidade transitória foi efetuada através do método SLEP, e as variáveis do modelo dinâmico consideradas em função das velocidades e posições angulares referidas ao centro de ângulos, com preservação da topologia original da rede e com a carga modelada por impedância constante, conforme esquema proposto por Fonseca & Decker [16].

A Melhoria da Segurança Dinâmica foi desenvolvida a partir do cálculo da sensibilidade da margem de segurança  $M_r$  com relação ao vetor tensão interna pré-falta das máquinas síncronas  $E^a$ .

Dentre as várias alternativas disponíveis para a formulação do problema de controle, no presente trabalho a Melhoria de Segurança Dinâmica foi efetuada através da alteração da tensão das barras



externas de geração, cuja transformação empregada corresponde ao uso da matriz  $H^a$  (equação 4.2.19). Desta maneira, é possível, através de ações de controle exercidas na situação pré-falta, corrigir-se a margem de segurança da contingência mais severa, conduzindo-a para um valor considerado seguro. O incremento de tensão é quantificado por meio de um algoritmo que leva em conta um critério de mínimo desvio do ponto nominal de operação.

O procedimento para o cálculo da sensibilidade da margem de segurança foi baseado na expansão, por séries de Taylor, das equações diferenciais que regem o sistema. Desta forma, a precisão do resultado pode ser monitorada através da magnitude do período de atualização dos coeficientes das séries, bem como pelo número de termos das séries.

O método SLEP apresenta soluções compatíveis com relação à simulação numérica, com custo computacional reduzido além de tempos críticos e margens de segurança para muitas contingências em um único processamento. Tais fatores foram fundamentais para o desenvolvimento do algoritmo proposto neste trabalho.

Para a aplicação da metodologia desenvolvida, foram efetuados testes computacionais utilizando-se dois sistemas de potência de grande porte compostos por 10 e 25 máquinas síncronas, onde foi possível a comprovação dos resultados de Melhoria de Segurança.

## 6.2. Sugestões Para Futuros Trabalhos

Em decorrência do desempenho e eficiência apresentados pela metodologia proposta neste trabalho em relação a precisão dos resultados, são sugeridos os seguintes tópicos para futuros desenvolvimentos de pesquisa :

- Desenvolvimento de programa computacional para o cálculo da sensibilidade da margem de segurança, assim como o algoritmo de alteração de tensão das barras externas de geração, a nível de usuário;
- Desenvolvimento de metodologia análoga à proposta, porém considerando a possibilidade de alteração de tensão em qualquer ponto da rede elétrica mediante chaveamento de elementos geradores de reativos controláveis (reatores e capacitores);
- Desenvolvimento de metodologia que considere outros tipos de ações de controle para Melhoria de Segurança Dinâmica como modificação na rede de transmissão, emprego de compensadores síncronos e/ou estáticos, transformadores defasadores, etc..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ANDERSON, P. M. and FOUAD, A. A. - Power System Control And Stability, Iowa State University Press, 1977.
- [02] ATHAY, T. ; PODMORE, R. and VIRMANI, S. - A Pratical Method For The Direct Analysis of Transient Stability, IEEE Trans.PAS, 1977, Vol. PAS-98, pp. 573-584.
- [03] ATHAY, T. ; SHERKET, V. R. ; PODMORE, R. ; VIRMANI, S. and PUECH, C. - Transient Energy Stability Analysis, Conference on 'System Engineering For Power', 1979, Davos, Switzerland.
- [04] BERGEN, A. R. and HILL, D. J. - A Struture Preserving Model For Power System Stability Analysis, IEEE Trans. PAS, 1981, Vol. PAS-100, No. 1, pp. 25-35.
- [05] CABREIRA, M. F. R. - Análise e Correção da Segurança Dinâmica Usando Estabilidade Transitória, Dissertação MSc., 1985, UFSC.
- [06] CASTI, J. L. - Nonlinear System Theory, Academic Press, 1985, USA.
- [07] CHANDRASHEKHAR, K. S. - Online Correction Dispatch Algorithm For Dynamic Security, IEE Proceedings, 1985, Vol. 132, Pt. C., No. 1, pp. 20-22.

- [08] CHANDRASHEKHAR, K. S. and HILL, D. J. - Dynamic Security Dispatch : Basic Formulation, IEEE Trans. PAS, 1983, Vol. PAS-102, No 7, pp. 2145-2152.
- [09] DORAISWAMI, R. and FONSECA, L. G. S. (1977) - A Fast And Reliable Dominion Of Transient Stability For Multimachine Power Systems, 1977, Paper A-77-060-7, IEEE Winter PES Power Meeting, N. York.
- [10] DECKER, I. C. - Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência Usando o Conceito de Superfície Limite de Energia Potencial, Dissertação MSc., 1984, UFSC.
- [11] DEMELLO, F. P. and CONCORDIA, C. - Concepts of Synchronous Machine Stability As Affected By Excitation Control, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-88, No. 4, 1969, pp. 316-329.
- [12] EL-GUINDI, M. and MANSOUR, M. - Transient Stability Of A Power System By The Liapunov Method Considering The Transfer Conductances, IEEE Trans.PAS, 1982, Vol. PAS-10, pp. 757-761.
- [13] EL-KADY, M. A. ; TANG, C. K.; CARVALHO, V. F.; FOUAD, A. A. and VITTAL, V. - Dynamic Security Assessment Utilizing The Transient Energy Function Method, IEEE Trans. Power Systems, Vol. PWRS-1, 1986, No. 3, pp. 284-291.
- [14] FLATABO, N. - The Use Of Sensitivity Techniques In The Calculation Of Reactive Power Reserves And Stability

Condition Of A Power Transmission System, I Symposium of Specialists in Electric Operational Planning, 1987, Rio de Janeiro-RJ, Brazil.

- [15] FONSECA, L. G. S. - Determinação de Domínios de Estabilidade Para Uso Em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência, Tese DSc., 1976, COPPE/UFRJ.
- [16] FONSECA, L. G. S. and DECKER, I. C. - Iterative Algorithm For Critical Energy Determination in Transient Stability of Power Systems, IFAC - Symposium Planning & Operation in Electric System, 1985, Rio de Janeiro-RJ, Brazil, pp. 483-489.
- [17] FONSECA, L. G. S.; DECKER, I. C. e PEDROSO, A. S. - Estudo Comparativo de Métodos de Avaliação da Estabilidade Transitória, ERLAC-CIGRE, 1989, Foz do Iguaçu-PR, Brasil.
- [18] FONSECA, L. G. S. e MINUSSI, C. R. - Correção de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica Considerando-se Falhas Tipo Curto-Circuito, (1989), VIII Congresso Chileno de Engenharia, Chile.
- [19] FONSECA, L. G. S. e MINUSSI, C. R. - Redespacho de Geração Para Controle de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica Através de Análise de Sensibilidade, VIII CBA, 1990, Belém-PA, Brasil.

- [20] FONSECA, L. G. S. ; MINUSSI, C. R. e COLVARA, L. D. - Melhoria da Segurança Dinâmica em Sistemas de Potência Considerando a Estabilidade Transitória, IV CBA, 1982, Campinas-SP, Brasil, pp. 433-438.
- [21] FONSECA, L. G. S. e PEDROSO, A. S. - Correção da Segurança Dinâmica em Sistemas de Potência de Grande Porte Via Redespacho, VIII CBA, 1990, Belém-PA, Brasil.
- [22] FONSECA, L. G. S.; SAVI, T. C. O. e MOROZOWSKI Fo., M. - Redespacho de Geração Visando Melhoria de Segurança, IV CBA, 1982, Campinas-SP, Brasil, pp. 502-507.
- [23] FOUAD, A. A. and STATON, S. E. - Transient Stability Of A Multi-Machine Power System, Part I : Investigation Of System Trajectories, IEEE Trans. PAS, 1981, Vol. PAS-100, No.7, pp. 3408-3416.
- [24] FOUAD, A. A.; VITTAL, V.; NI, Y-X.; ZEIN-ELDIN, H. M.; VAAHEDI, E.; POTA, H. R.; NOHEDI, K. and KIM, J. - Direct Transient Stability Assessment With Excitation Control, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 1, 1989, pp. 75-82.
- [25] FOUAD, A. A.; VITTAL, V. ; RAJAGOPAL, S. ; CARVALHO, V. F. ; EL-KADY, M. A. ; TANG, C. K. ; MITSCHKE, J. V. and PEREIRA, M. V. - Direct Transient Stability Analysis Using Energy Functions Application To Large Power Networks, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.PWRS-2, No.1, 1987, pp. 37-44.

- [26] FRANK, P. M. - Introduction To System Sensivity Theory, Academic Press, 1978, New York.
- [27] HAQUE, M. H. and RAHIM, A. H. M. A. - Determination of First Swing Stability Limit of Multimachine Power Systems Throught Taylor Series Expansions, IEE Proceedings, 1989, Vol. 136, Pt. C, No.6, pp. 373-379.
- [28] HEHL, M. E. - Linguagem de Programação Estruturada Fortran 77, McGraw-Hill, São Paulo, 1986.
- [29] LACHS, W. R. - A New Transient Stability Control, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-2, No. 4, 1987, pp. 980-986.
- [30] LEMMON, W. W.; MAMANDUR, K. R. C. and BARCELO, W. R. - Transient Stability Prediction And Control in Real-time By QUEPS, IEEE Trans. Power Systems, 1989, Vol. 4, No. 2, pp. 627 642.
- [31] MAGNUSSON, P. C. - The Transfer - Energy Method Of Calculation Stability, AIEE Transactions, 1947, Vol. 66, pp. 747-755.
- [32] MINUSSI, C. R. - Controle de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica, Tese DSc., 1990, UFSC.
- [33] MITTESTADT, W. A. and SAUGEN, J. L. - A Method of Improving Power System Transient Stability Using Controllable Parameters, IEEE Trans. PAS, 1970, Vol. PAS-89, No. 1,

pp. 23-27.

- [34] MONTICELLI, A. - Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Ed. Edgard Blucher, 1983.
- [35] MONTOYA, N. D. - Cálculo da Capacidade de Intercambio Simultaneo em Sistemas Interligados com Restrição de Estabilidade Transitória, Dissertação MSc., 1990, UFSC.
- [36] OPOKU, G. - Optimal Power System VAR Planning, IEEE Trans. Power Systems, 1990, Vol. 5, No. 1, pp. 53-60.
- [37] PAI, M. A. - Power System Stability Analysis by the Direct Method of Liapunov North-Holland Systems And Control Series, Vol. 3, 1981.
- [38] PAI, M. A. and VARWANDKAR, S. D. - On The Inclusion of Transfer Conductances in Liapunov Functions For Multimachine Power Systems, IEEE Trans. Automatic Control, 1977, Vol. AC-22, pp. 983-985.
- [39] RIBBENS-PAVELLA, M. and EVANS, P. J. - Direct Methods For Studying Dynamics of Large-Scale Electric Power Systems - A Survey, Automatica, 1985, Vol. 21, pp. 1-21.
- [40] STAGG, G. W. and EL-ABIAD, A. H. - Computer Methods in Power System Analysis, McGraw-Hill Book Company, 1968.



- [41] TAVORA, C. J. and SMITH, O. J. M. - Characterization of Equilibrium And Stability in Power Systems, IEEE Trans. PAS, 1971, Vol. PAS-91, pp. 1127-1130.
- [42] VENKATARAMANA, A.; CARR, J. and RANSHAW, R. S. - Optimal Reactive Power Allocation, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-2, No. 1, 1987, pp. 138-144.
- [43] VITTAL, V.; ZHOU, E-Z.; HWANG, C. and FOUAD, A. A. - Derivation on Stability Limits Using Analytical Sensitivity of The Transient Energy Margin, IEEE Trans. Power Systems, 1989, Vol. 4, No. 4, pp. 1363-1372.
- [44] XUE, Y. and RIBBENS-PAVELLA, M. - Extended Equal Area Criterion: An Analytical Ultra-Fast Method For Transient Stability Assessment And Preventive Control of Power Systems, Electrical Power & Energy Systems, 1989, Vol. 11, No. 2, pp. 131-149.
- [45] XUE, Y.; VAN CUTSEN, Th. and RIBBENS-PAVELLA, M. - Real-time Analytic Sensitivity Method For Transient Security Assessment And Preventive Control, IEE Proc., 1988, Vol. 135, Pt.C, No.2, pp. 107-116.
- [46] YOUNG, C. C.- The Synchronous Machine, IEEE Tutorial Course : Modern Concepts of Power System Dynamic, IEEE, New York, 1970.

APENDICE A

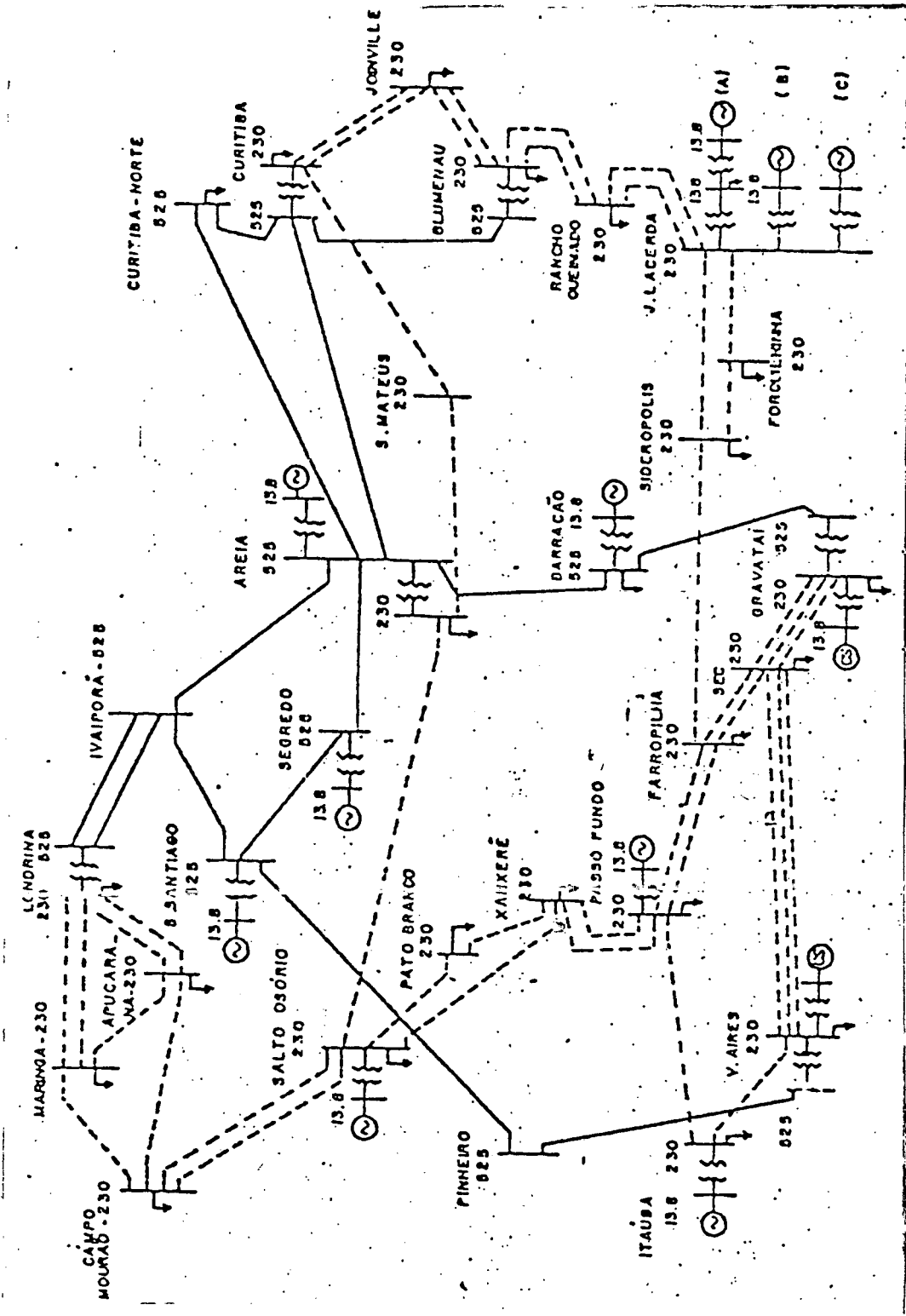


Diagrama Unifilar do Sistema 10 Máquinas do Sul do Brasil

## SISTEMA SUL-BRASILEIRO SIMPLIFICADO - 10 MAQUINAS - CASO BASE \*

DADOS DE LINHAS E TRANSFORMADORES						
LINHA	DA BARRA	PARA BARRA	RESISTENCIA SERIE POR CENTO	REATANCIA SERIE POR CENTO	CARREGAMENTO CAPACITIVO MVAR	TAP PU.
1	343	344	0.070	1.450	166.100	
2	343	344	0.070	1.450	166.100	
3	343	382	0.180	2.270	227.210	
4	343	391	0.140	2.040	244.750	
5	344	431	0.0	0.630	0.0	
6	366	386	0.0	1.350	0.0	
7	367	368	3.860	19.850	34.000	
8	367	396	0.960	4.910	8.420	
9	367	437	0.330	1.670	28.590	
10	368	370	4.630	23.780	40.840	
11	368	370	4.630	23.780	40.840	
12	368	399	1.770	9.100	15.850	
13	368	399	1.770	9.100	15.850	
14	368	399	1.770	9.100	15.850	
15	369	370	0.0	4.600	0.0	
16	370	371	1.630	8.350	14.400	
17	370	371	1.630	8.350	14.400	
18	370	408	2.500	15.480	46.900	
19	371	372	1.630	8.350	14.400	
20	371	374	3.160	16.210	27.840	
21	372	374	1.530	8.610	13.440	
22	373	374	0.0	1.140	0.0	
23	374	375	3.060	15.230	27.020	
24	374	433	3.440	17.600	30.400	
25	374	433	3.440	17.600	30.400	
26	375	376	2.450	12.560	20.410	
27	375	382	0.0	3.000	0.0	
28	376	377	0.880	4.150	52.110	
29	377	378	1.820	9.350	15.950	
30	377	378	1.820	9.350	15.950	
31	377	383	0.0	0.620	0.0	
32	378	379	1.540	7.760	13.500	
33	378	379	1.540	7.760	13.500	
34	379	380	2.160	11.050	18.630	
35	379	380	2.160	11.050	18.630	
36	379	385	0.0	0.620	0.0	
37	380	396	1.800	9.200	15.530	
38	380	396	1.800	9.200	15.530	
39	381	382	0.0	0.670	0.0	
40	382	383	0.190	2.800	335.760	
41	382	384	0.190	2.740	328.670	
42	382	386	0.140	1.950	239.680	
43	382	398	0.050	0.700	83.920	
44	383	384	0.050	0.690	82.160	
45	383	385	0.120	1.750	209.700	
46	386	387	0.210	3.090	371.830	
47	387	402	0.0	0.620	0.0	
48	388	389	0.220	3.000	383.000	
49	388	414	0.0	0.620	0.0	
50	389	391	0.140	1.950	239.700	
51	390	391	0.0	1.140	0.0	
52	391	398	0.050	0.700	83.920	
53	392	393	0.0	8.710	0.0	
54	393	396	0.0	5.900	0.0	
55	394	396	0.0	7.010	0.0	
56	395	396	0.0	4.500	0.0	
57	396	437	1.290	6.570	11.280	
58	397	398	0.0	0.680	0.0	
59	399	402	0.220	1.110	2.320	
60	399	402	0.220	1.110	2.320	
61	399	402	0.190	1.010	2.040	
62	399	414	2.070	9.330	17.180	
63	399	414	1.680	9.300	17.200	
64	399	414	1.760	9.840	17.980	
65	407	408	0.0	2.360	0.0	
66	408	414	2.020	11.290	20.620	
67	430	431	1.250	6.410	11.090	
68	430	431	0.890	4.610	7.960	
69	430	432	1.100	11.840	20.270	
70	430	433	2.290	11.740	20.270	
71	431	432	1.720	8.840	14.340	
72	431	432	1.720	8.840	14.340	
73	432	433	1.810	9.290	16.070	

## \*\*\* SISTEMA SUL-BRASILEIRO SIMPLIFICADO - 10 MAQUINAS - CASO BASE \*\*\*

DADOS DE BARRAS										
BARRA NUM.	NOME	TIPO	T E N S A O		G E R A C A O		C A R G A		CAPACITOR OU REATOR MVAR	
			MODULO PU.	ANGULO GRAUS	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR		
366	ITA	-GER	1	1.020	-11.00	650.00	-30.10	0.0	0.0	0.0
369	P.FUNDO	-GER	1	1.040	-17.00	215.00	66.30	0.0	0.0	0.0
373	S.OSORIO	-GER	1	0.980	5.00	895.00	149.00	0.0	0.0	0.0
381	GBMUNHOZ	-GER	2	1.022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
390	S.SANTIA	-GER	1	1.018	3.00	1325.00	-46.70	0.0	0.0	0.0
392	J.LAC.A	-GER	1	1.030	-29.00	90.00	44.70	0.0	0.0	0.0
394	J.LAC.B	-GER	1	1.030	-28.00	120.00	52.90	0.0	0.0	0.0
395	J.LAC.C	-GER	1	1.030	-26.00	241.00	87.40	0.0	0.0	0.0
397	SEGREDO	-GER	1	1.020	0.0	1100.00	0.0	0.0	0.0	0.0
407	ITAUBA	-GER	1	1.020	-15.00	460.00	85.60	0.0	0.0	0.0
343	IVAIPORA	-525	0	1.034	-11.00	0.0	0.0	0.0	0.0	-200.00
344	LONDRINA	-525	0	1.024	-13.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
367	SIDERPO	-230	0	0.967	-37.00	0.0	0.0	177.00	68.00	0.0
368	FARROUPI	-230	0	1.020	-36.00	0.0	0.0	191.00	42.00	0.0
370	P.FUNDO	-230	0	1.015	-22.00	0.0	0.0	171.00	18.50	0.0
371	XANXERE	-230	0	0.987	-18.00	0.0	0.0	126.00	47.00	0.0
372	P.BRANCO	-230	0	0.986	-11.00	0.0	0.0	46.00	14.70	0.0
374	S.OSORIO	-230	0	1.010	-2.00	0.0	0.0	281.00	56.50	0.0
375	AREIA	-230	0	0.998	-15.00	0.0	0.0	279.00	60.70	0.0
376	S.MATEUS	-230	0	0.973	-26.00	0.0	0.0	130.00	29.40	0.0
377	CURITIBA	-230	0	0.979	-26.00	0.0	0.0	427.00	-25.00	0.0
378	JOINVILE	-230	0	0.923	-33.00	0.0	0.0	310.00	141.00	0.0
379	BLUMENAU	-230	0	0.958	-32.00	0.0	0.0	424.00	90.60	0.0
380	PALHOCA	-230	0	0.967	-34.00	0.0	0.0	117.00	53.10	0.0
382	AREIA	-525	0	1.025	-10.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
383	CURITIBA	-525	0	0.982	-24.00	0.0	0.0	0.0	0.0	-150.00
384	C.LARGO	-525	0	0.984	-22.00	0.0	0.0	368.00	69.60	0.0
385	BLUMENAU	-525	0	0.965	-29.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
386	ITA	-525	0	1.028	-16.00	0.0	0.0	174.00	-8.20	-100.00
387	GRAVATAI	-525	0	1.032	-33.00	0.0	0.0	0.0	0.0	-150.00
388	V.AIRES	-525	0	1.034	-26.00	0.0	0.0	0.0	0.0	-150.00
389	C.NOVOS	-525	0	1.037	-13.00	0.0	0.0	0.0	0.0	-150.00
391	S.SANTIA	-525	0	1.034	-5.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
393	J.LACERD	-138	0	0.995	-34.00	0.0	0.0	126.00	39.80	0.0
396	J.LACERD	-230	0	0.997	-32.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
398	SEGREDO	-525	0	1.028	-5.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
399	SECI	-230	0	1.035	-36.00	0.0	0.0	813.00	110.00	0.0
402	GRAVATAI	-230	0	1.044	-36.00	0.0	0.0	612.00	-455.00	0.0
408	ITAUBA	-230	0	0.987	-22.00	0.0	0.0	404.00	135.00	0.0
414	V.AIRES	-230	0	1.040	-28.00	0.0	0.0	393.00	-111.00	0.0
430	APUCARAN	-230	0	0.990	-18.00	0.0	0.0	262.00	13.20	0.0
431	LONDRINA	-230	0	1.009	-15.00	0.0	0.0	229.00	183.00	0.0
432	MARINGA	-230	0	0.978	-18.00	0.0	0.0	184.00	60.20	0.0
433	C.MOURAO	-230	0	0.970	-15.00	0.0	0.0	139.00	53.70	0.0
437	FORQUILH	-230	0	0.965	-36.00	0.0	0.0	90.10	55.30	0.0

## DADOS DOS ROTORES

BARRA NUM. POR CENTO	REATANCIA TRANSITORIA -MW.S/MVA	CONSTANTE DE INERCIA
366	4.570	37.320
369	9.850	11.300
373	3.000	39.470
381	1.800	74.400
390	2.150	57.280
392	13.500	3.560
394	15.350	5.060
395	10.070	9.680
397	1.840	51.630
407	5.500	20.340