UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"CONTROLE DE SEGURANÇA DINÂMICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA"

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM CIÊNCIAS (D.Sc.)

CARLOS ROBERTO MINUSSI

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO / 90

BIOGRAFIA DO AUTOR

- Nascido em Santa Maria, Rio grande do Sul, em 07 de maio de 1952.
- Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria em dezembro de 1978.
- Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em março de 1981.
- Professor Assistente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Universitário de Ilha Solteira - SP, a partir de março de 1981.
- Autor ou co-autor de cerca de 10 trabalhos publicados em Análise de Estabilidade Transitória e Controle de Segurança Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica.

CONTROLE DE SEGURANÇA DINÂMICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

CARLOS ROBERTO MINUSSI

ESTA TESE RECEBEU PARECER FAVORÁVEL PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

DOUTOR EM CIÊNCIAS (DSc.)

ESPECIALIDADE ENGENHARIA **ELÉTRICA** E FOI APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

LUIZ GONZAGA DE SOUZA FONSECA, DSc. - ORIENTADOR

JOÃO PEDRO ASSUMPÇÃO BASTOS, Dr. D'Etat - COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA:

LUIZ GONZAGA DE SOUZA FONSECA, DSc. - ORIENTADOR

ALQUINDAR DE SOUZA PEDROSO, MSc.

ANTÔNIO JOSÉ ALVES SIMÕES COSTA, PhD.

DJALMA MOSQUEIRA FALCÃO, PhD.

HANS HELMUT ZÜRN, PhD.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para o **controle de segurança** em Sistema de Energia Elétrica, considerando-se a estabilidade transitória e faltas tipo curto-circuito.

O diagnóstico da estabilidade transitória é efetuado através do método **SLEP** (Superfície Limite de Energia Potencial), em vista deste método apresentar algumas vantagens de aplicação, tais como: preservação topológica da rede, tempo de cálculo reduzido e precisão comparável aos métodos de simulação numérica. O método de controle de segurança é desenvolvido através da **análise de sensibilidade**, utilizando-se o conceito de margem de segurança. Determina-se um modelo incremental entre a variação da margem de segurança e o vetor correspondente às posições angulares das máquinas síncronas, referidas ao centro de ângulos. O uso deste modelo permite o desenvolvimento de várias alternativas de controle, *e.g.*, via redespacho de geração, corte de carga, mudança topológica da rede, etc., bastando, apenas, utilizar-se transformações apropriadas. Neste trabalho, utiliza-se o redespacho de geração como ação de controle. Assim sendo, estabelece-se um procedimento a partir do qual pode-se estimar o redespacho de geração, de modo que os efeitos dos transitórios eletromecânicos sejam alterados para níveis considerados seguros. O redespacho de geração é determinado minimizando-se o desvio em torno do estado nominal de geração.

São apresentados resultados da aplicação da metodologia proposta, considerando-se dois sistemas-teste, constituidos por 10 e 20 máquinas síncronas, respectivamente, baseados na configuração da região Sul do Brasil e IEEE com 118 barras.

A B S T R A C T

This work presents a methodology for **Preventive Control** in Electric Power Systems, considering the transient stability and three-phases fault.

The transient stability assessment is performed by the **PEBS** (Potential Energy Boundary Surface) method, because it method presents many application advantages, such as: structure-preserving dynamic model, reduced calculation time and accuracy comparable to numerical simulations. The preventive control method is developed by **sensitivity analysis**, using the security margin concept. In this way, an incremental model between the security margin change and the pre-fault angular position of the synchronous machines, relative to inertial center is determined. The use of this model allows the development of several control alternatives, *e.g.*, by generation rescheduling, load shedding, system topological change, etc., being necessary only to utilize appropriate transformations. In this work, we define a procedure to estimate the generation rescheduling such that the transient stability effect is minimized to levels considered secure. The generation rescheduling is determined by minimizing the change of the generation nominal state.

The application results of the proposed method are presented considering two test systems, composed of 10 and 20 synchronous machines, respectively, based on the Southern Brazil system configuration and the IEEE 118 bus system.

Aos meus pais, José e Almerinda, **in memorian.**

A Maria Marli, minha mulher.

Aos meus filhos Roberta e Fernando.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. **Luiz Gonzaga de Souza Fonseca**, pela orientação, sugestões, acompanhamento e, especialmente pelo acolhimento e credibilidade dedicados em momento difícil de minha vida profissional.

Ao colega e amigo **Júlio Borges de Souza** que, mesmo em situações difíceis, não hesitou em tomar atitudes de confiança em defesa para a realização deste trabalho.

Ao Chefe de Departamento, Prof. **Aparecido Augusto de Carvalho** e demais colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP - Campus de Ilha Solteira, colegas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, aos Professores, funcionários e amigos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A **Maria Marli**, minha mulher, pela revisão e sugestões que contribuíram grandemente à qualidade do texto em sua forma preliminar.

A Universidade Estadual Paulista (UNESP), pelo apoio financeiro.

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

Os superscritos (a), (d) e (p) denotam estados e configurações pré, sob e pós-defeito, respectivamente.

O subscrito (e) indica que o estado correspondente refere-se ao instante de eliminação do defeito.

Os subscritos (g) e (ℓ) denominam barras de geração e cargas, respectivamente.

Letras em negrito maiúsculas e minúsculas representam, respectivamente, matrizes e vetores.

$\mathbb{R}$ = Campo dos números reais

n = Número de máquinas síncronas do sistema

N = { 1,2,...,n } ⟵ Conjunto de índices das máquinas síncronas que compõem o sistema

H = Constante de inércia (s)

M = 2 H/2πfo

fo = Freqüência nominal da rede (Hz)

d = Constante de amortecimento (pu)

δ = Posição angular da máquina síncrona medida com relação à um eixo que gira à velocidade síncrona (rad. elét.)

Pm = Potência mecânica (pu)

Pe = Potência elétrica (pu)

t = Tempo (s)

θ = Posição angular da máquina síncrona referida ao centro de ângulos (rad. elét.)

PCA = Potência acelerante do centro de ângulos (pu)

E = Tensão interna da máquina síncrona (pu)

Vg = Tensão terminal da máquina síncrona (pu)

e = Parte real de Vg (pu)

f = Parte imaginária de Vg (pu)

x'd = Reatância transitória de eixo direto (pu)

Ci = $Ei \cos(\theta i)/x'di$

Di = $Ei \, \mathrm{sen}(\theta i)/x'di$

Zgg = Matriz de impedância de geração

R = Parte real de Zgg

X = Parte imaginária de Zgg

m = Número total de nós do sistema

$\| a \|_e$ = Norma Euclidiana de $a \in \mathbb{R}^n$

V = Função de Liapunov

$\mathbb{D}$ = Domínio de estabilidade

$E(\theta,\dot{\theta})$ = Energia total do sistema

Ec = Energia cinética

Ep = Energia potencial

$\mathcal{M}$ = Margem de segurança

$\mathbb{M}$ = Margem de segurança do sistema

$\mathcal{M}_{min}$ = Margem de segurança mínima permissível

$\mathcal{M}^0$ = Margem de segurança inicial

$\mathcal{M}_A$ = Margem de segurança alvo

$\mathcal{M}_M$ = Margem de segurança limite máximo (para monitoração)

$\Delta\mathcal{M}$ = Deslocamento da margem de segurança

t_{crit} = Tempo crítico (s ou ciclos)

t_e = Tempo de eliminação de defeito (s ou ciclos)

$\mathcal{D}$ = Derivada direcional da energia potencial

SLEP = Superfície Limite de Energia Potencial

<a, b> = Produto interno de **a** e **b**, **a**, **b** $\in \mathbb{R}^n$

$\frac{\partial(\circ)}{\partial X}$ = Derivada parcial de ($\circ$) com relação à **X**

$\frac{\partial \mathcal{M}}{\partial X}$ = Sensibilidade (gradiente) da margem de segurança com relação à **X**

δ_{ij} = Delta de Kronecker

$\overset{(q)}{X}$ = q-ésima derivada temporal de X

$\frac{\partial X(t,\hbar)}{\partial \hbar}$ = Vetor sensibilidade de trajetória com relação ao parâmetro $\hbar$, onde **X** é a solução do sistema não-linear autônomo, $\dot{X} = f(X)$,

H = Matriz Jacobiana da Pe com relação à θ

H_{EQ} = Matriz Jacobiana de Pe com relação à θ e adoção de uma máquina como referência do sistema

R = Número de contingências em sobrecarga

FO = Função objetivo

α e μ = Coeficientes da função objetivo multi-segmentos, tipo mínimo esforço, referentes aos acréscimos negativos de geração

β e σ = Coeficientes da função objetivo multi-segmentos, tipo mínimo esforço, referentes aos acréscimos positivos de geração

$P_{mín}$ = Limite mínimo permissível da potência mecânica

$P_{máx}$ = Limite máximo permissível da potência mecânica

Pm^0 = Potência mecânica referente ao estado nominal de operação

$\mathcal{E}$ = Esforço de deslocamento da margem de segurança (EDMS)

NFE = Não foi possível encontrar a SLEP considerando falta sustentada por por um período igual ao tempo de simulação pré-especificado.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) interligados são concebidos com o propósito de tornar o atendimento ao mercado racional e flexível, permitindo eventuais intercâmbios entre áreas de acordo com interesses mútuos, devido à deficiência ou excesso de recursos energéticos. Todavia, o funcionamento destes sistemas tem se tornado cada vez mais complexo, em vista da extraordinária dimensão dos mesmos e, principalmente, de sua natureza não-linear.

O comportamento não-linear exige permanente monitoração do desempenho do sistema frente a perturbações (contingências) que freqüentemente ocorrem no sistema. Nos casos instáveis, ou havendo violação dos limites de capacidade dos equipamentos, é imperativo a adoção de medidas que possibilitem conduzir o sistema ao estado seguro, sendo esta atividade chamada **controle preventivo** ou **controle de segurança.**

Neste trabalho a questão da segurança será tratada considerando-se os aspectos dinâmicos da rede, ou seja, os efeitos provocados por perturbações que causam oscilações acentuadas nos ângulos das máquinas síncronas (estabilidade transitória), *e.g.*, saída de equipamentos elétricos, curto-circuito, etc. Tais perturbações podem provocar a interrupção do fornecimento, resultando em prejuízo às companhias do setor elétrico e, principalmente, aos consumidores. É importante ressaltar que, para se analisar e prevenir estes efeitos, é imperativo que a segurança, via critérios estáticos, também seja observada.

O **controle preventivo** quando leva em conta o problema da estabilidade eletromecânica, é chamado, por conveniência, **controle** ou **correção de segurança dinâmica.**

A análise de estabilidade transitória em SEE pode ser efetuada, por exemplo, através da solução numérica das equações diferenciais que descrevem o movimento do sistema (simulação) e, posteriomente, pelo exame da solução obtida (curvas de oscilação das máquinas síncronas). As técnicas para simulação são precisas e não há restrições quanto à qualidade do modelo. Exigem, porém, a participação de um especialista no processo, o que eleva consideravelmente o tempo de análise. Além disto, não é fácil reconhecer quão estável / instável é o sistema associado à contingência sob avaliação. Por outro lado, o método direto de Liapunov (MDL) permite que se analise a estabilidade de modo sistematizado, com tempo de cálculo competitivo e com resultados considerados satisfatórios, quando se tratar do modelo clássico (Fonseca *et al.* [20], Ribbens-Pavella & Evans [41]). Para modelos mais elaborados, não existem, ainda, resultados concretos. Entretanto a literatura tem relatado esforços neste sentido e espera-se que em curto e médio prazo, haverá possibilidade de se analisar também modelos mais realistas. Salienta-se, entretanto, que para os objetivos deste trabalho, o MDL representa no momento talvez a única técnica que proporciona uma base para o desenvolvimento de uma metodologia para o controle de segurança dinâmica.

Assim sendo, o estudo da estabilidade será efetuado, neste trabalho, via MDL usando-se funções tipo energia, considerando-se a dinâmica do sistema representada pelo modelo clássico.

Os métodos para controle de segurança dinâmica surgiram há pouco menos de dez anos. O número de publicações disponíveis é pequeno, e ainda não se pode destacar um método que apresente desempenho satisfatório do ponto de vista da qualidade das soluções e tempo de cálculo. Basicamente, encontram-se três grupos de metodologias, assim distribuídos:

Grupo 1. Neste grupo incluem-se os métodos de Fonseca *et al.* [21] e [24], Cabreira [08] e Fonseca & Minussi [22], os quais são baseados no método direto de Liapunov com domínios de estabilidade calculados via método do politopo (Doraiswami & Fonseca [15]). O controle de segurança dinâmica consiste no redespacho da geração e/ou alívio de carga visando aumentar o domínio de estabilidade para contingências consideradas instáveis.

Grupo 2. Encontram-se, neste grupo, os métodos de Chandrashekhar & Hill [13] e Chandrashekhar [12] , gerados a partir do modelo dinâmico, com preservação da topologia da rede, proposto por Bergen & Hill [05]. A correção de segurança dinâmica é baseada no deslocamento do corte vulnerável (crítico) associado a uma contingência instável para um valor menos crítico. Com isto, ocorrerá, segundo os autores, uma melhoria da segurança. O corte vulnerável representa a base do desenvolvimento do método de análise.

Grupo 3. O estudo de estabilidade, assim como a correção de segurança, são estabelecidos a partir de um modelo equivalente a uma máquina síncrona contra a barra infinita. Este modelo é deduzido tomando-se dinâmica do grupo de máquinas críticas, *i.e.*, aquelas com maiores excursões angulares, adquiridas durante o transitório, contra o grupo de máquinas não-críticas. O sucesso da análise e do controle de segurança dinâmica depende, em princípio, do conhecimento prévio das máquinas críticas. Entretanto, estas só poderão ser conhecidas mediante a conclusão da análise. Resultados comparativos, considerando-se as principais técnicas de análise, apresentados na referência Fonseca *et al.* [20] corroboram às observações acima, ou seja, os resultados ora são inferiores, ora são superiores aos valores determinados por simulação numérica, havendo em alguns casos erros consideráveis. Os métodos típicos deste grupo são encontrados em: Xue *et al.* [50], Xue & Ribbens-Pavella [49] e Lemmon *et al.* [30].

Considerando a importância do problema da correção da segurança e os resultados ainda incipientes, este trabalho visa o desenvolvimento de um algoritmo para o controle de segurança dinâmica, para faltas severas tipo curto-circuito seguido da perda de algum equipamento do sistema.

Tal algoritmo será desenvolvido através do uso da **análise de sensibilidade** (Brewer [06], Frank [26]) e método de **otimização** (Gass [27], Luenberger [31]), buscando-se, assim, encontrar soluções ótimas considerando algum critério de mínimo deslocamento do ponto de equilíbrio. A análise de estabilidade será determinada pelo método **SLEP** (Superfície Limite de Energia) (Fonseca & Decker [19]), sendo este baseado no MDL. A rapidez e precisão dos resultados fornecidos pelo SLEP são os requisitos imprescindíveis para o desenvolvimento de uma metodologia eficiente de controle de segurança dinâmica. É importante salientar que o modelo de sensibilidade proposto poderá ser resolvido tal como um problema convencional de análise de segurança via critérios estáticos, incluindo-se apenas novas restrições ao problema, relativas à estabilidade transitória.

A proposta de solução do problema de controle de segurança consiste na linearização (análise de sensibilidade) da margem de segurança obtida com o método SLEP e representa uma extensão da aplicação daquela metodologia (Fonseca & Decker [19]).

Este texto está assim organizado: No capítulo 2 apresenta-se o modelo do sistema com referência ao centro de ângulos e preservação da topologia da rede. No capítulo 3 são apresentados os conceitos básicos da análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica pelo método direto de Liapunov, com formulação através do método SLEP. No capítulo 4 apresentam-se o problema do controle de segurança dinâmica, o estado da arte e a análise crítica com relação às principais referências encontradas, evidenciando-se, assim, a necessidade da proposição de uma metodologia mais eficiente. No capítulo 5 o controle de segurança dinâmica é formulado através da análise de sensibilidade. No capítulo 6 utilizam-se os indicadores para o controle de segurança dinâmica através de um algoritmo para redespacho da geração formulado por programação linear. No capítulo 7 são apresentados os testes computacionais considerando-se dois sistemas baseados na configuração referente à região Sul do Brasil e sistema IEEE de 118 barras, respectivamente. Finalmente, no capítulo 8 apresentam-se as conclusões do trabalho, assim como sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

MODELO DO SISTEMA

2.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se o modelo matemático que descreve a dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica para perturbações que causam grandes impactos tipo perda de equipamento, curto-circuito, etc.

O modelo da máquina síncrona conhecido como modelo clássico tem sido muito utilizado, sobretudo em análise relativa ao ambiente "on-line" ou em planejamento onde muitas avaliações devem ser feitas.

Assim, a metodologia aqui proposta para correção de segurança dinâmica, será desenvolvida considerando o modelo clássico com inclusão das condutâncias de transferência.

No modelo dinâmico, a solução das equações das máquinas síncronas e da rede elétrica será efetuada via preservação da topologia da rede (sem redução às barras internas de geração), baseada na proposta apresentada na referência Fonseca & Decker [19].

2.2 Modelo Com Referência Ao Centro De Ângulos

Considerando-se um Sistema de Energia Elétrica constituído por n máquinas síncronas, a equação diferencial que descreve o movimento da i-ésima máquina síncrona (modelo clássico) é expressa por

$$\dot{\delta}_i = w_i$$

$$M_i \dot{w}_i = Pm_i - Pe_i - d_i w_i \quad , \qquad i \in N \qquad (2.2.1)$$

O índice i em (2.2.1.) refere-se ao número da máquina síncrona atribuído no modelo. As grandezas e parâmetros do modelo são assim definidos:

M_i = 2 H_i / $2\pi fo$

H_i = Constante de inércia (s)

fo = Frequência nominal da rede (60 Hz)

d_i = Constante de amortecimento (pu)

δ_i = Posição angular medida com relação a um eixo que gira à velocidade síncrona (rad. elét.)

w_i = Desvio de velocidade angular da máquina síncrona com relação à velocidade síncrona

Pm_i = Potência mecânica de entrada (pu)

Pe_i = Potência elétrica entregue pela máquina síncrona (pu)

N = { 1,2,..., n } = Conjunto de índices das máquinas que compõem o sistema.

O ponto colocado sobre variáveis representa o operador diferencial (d/dt), onde:

t = Tempo (s) .

Em vista da preservação das condutâncias de transferência, é conveniente adotar-se o <u>centro de ângulos</u> como referência do sistema. Esta representação é interessante sob ponto de vista de destacar a parcela da energia cinética do sistema associada ao movimento relativo da máquina em relação ao centro de ângulos.

Assim sendo, o novo modelo será expresso por (Athay *et al.* [02], Fonseca & Decker [19], Pai [38], Fouad & Stanton [25])

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i &= \omega_i \\ M_i \dot{\omega}_i &= Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{MT} PCA - d_i \omega_i \end{aligned} \tag{2.2.2}$$

onde:

$PCA \triangleq$ Potência acelerante do centro de ângulos

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

$MT \triangleq \sum_{j \in N} M_j$

θ_i = Posição angular da i-ésima máquina síncrona referida ao centro de ângulos

$= \delta_i - \delta_o$ (2.2.3)

ω_i = Velocidade angular da i-ésima máquina síncrona referida ao centro de ângulos

$= w_i - w_o$

$$\delta o = \frac{1}{MT} \sum_{j \in N} Mj \ \delta j \tag{2.2.4}$$

$$wo = \dot{\delta} o \ .$$

A formulação, com referência ao centro de ângulos (equação (2.2.2)) possui as seguintes propriedades:

Propriedade 1. A potência acelerante do centro de ângulos, avaliada no ponto de equilíbrio estável, é nula (Pai [38]).

Propriedade 2.

$$\sum_{j \in N} Mj \ \theta j = 0 \tag{2.2.5}$$

Prova:

Substituindo-se (2.2.3) em (2.2.5) resulta em

$$\sum_{j \in N} Mj \ \theta j = \sum_{j \in N} Mj \ (\delta j - \delta o) \tag{2.2.6}$$

$$= \sum_{j \in N} Mj \ \delta j - \delta o \sum_{j \in N} Mj$$

Agora, substituindo-se (2.2.4) em (2.2.6), obtém-se

$$\sum_{j \in N} Mj \ \theta j = \sum_{j \in N} Mj \ \delta j - \frac{1}{MT} \left(\sum_{k \in N} Mk \ \delta k \right) MT$$

$$= 0 \qquad \square.$$

<u>**Propriedade 3**</u>

$$\sum_{j \in \mathbf{N}} M_j \, \dot{\theta}_j = 0 \tag{2.2.7}$$

A prova desta propriedade é similar, bastando, apenas, substituir δ por $\dot{\delta}$ nas equações acima.

Deste modo, os ângulos θi's são linearmente dependentes. O mesmo se observa em relação às velocidades $\dot{\theta} i$'s. Portanto, o conhecimento de (2n - 2) variáveis de estado permite o cálculo das duas restantes usando-se (2.2.5) e (2.2.7).

No modelo (2.2.2) os amortecimentos são considerados uniformes ($d_i / M_i = d_j / M_j$, $\forall\ i,j \in$ N) e, a conexão entre as máquinas síncronas e a rede elétrica é feita sem redução às barras internas (Fonseca & Decker [19]).

Neste caso, a potência elétrica pode ser expressa por (Fonseca & Decker [19])

$$Pe_i = - C_i \, f_i + D_i \, e_i \tag{2.2.8}$$

onde:

$$C_i \triangleq E_i \, B_i \cos(\theta_i) \tag{2.2.9}$$

$$D_i \triangleq E_i \, B_i \operatorname{sen}(\theta_i) \tag{2.2.10}$$

As variáveis e_i e f_i são, respectivamente, as partes real e imaginária da tensão da i-ésima barra terminal de geração, sendo E_i a tensão interna da i-ésima máquina, e

$$B_i \triangleq \frac{1}{X'_{di}}$$

sendo:

X'_{di} = Reatância transitória de eixo direto da i-ésima máquina síncrona.

Considerando-se as cargas representadas por impedâncias (admitâncias) constantes, as tensões e_i e f_i podem ser determinadas a partir da solução do sistema linear expresso por (Fonseca & Decker [19])

$$\begin{bmatrix} v_g \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gl} \\ Z_{lg} & Z_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_g \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.2.11}$$

onde:

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

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

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

sendo:

v_{gi} = Tensão terminal de geração

$= e_i + jf_i$

v_{li} = Tensão nas barras restantes do sistema (excetuadas as barras internas e terminais de geração)

i_{gi} = Corrente da i-ésima máquina síncrona

= $E_i\ B_i\ (\text{sen}\theta_i - j\cos\theta_i)$

m = Número total de barras do sistema.

Os subscritos (g) e (l) representam os índices relativos às barras de geração e de cargas, respectivamente.

As expressões analíticas das partes real e imaginária das tensões das barras terminais de geração são (Fonseca & Decker [19]):

$$e_i = \sum_{k \in N} [\ R_{ik}\ D_k + X_{ik}\ C_k\ ] \tag{2.2.12}$$

$$f_i = \sum_{k \in N} [-\ R_{ik}\ C_k + X_{ik}\ D_k\ ] \tag{2.2.13}$$

onde:

R e X são as partes real e imaginária da sub-matriz de impedância nodal $\mathbf{Z}_{gg}$ do sistema de equações (2.2.11).

Em resumo, o modelo do sistema é representado pelo conjunto de equações diferenciais e algébricas abaixo relacionado:

Equações Diferenciais

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i \\ M_i\,\dot{\omega}_i = Pm_i - Pe_i - \dfrac{M_i}{MT}\,PCA - d_i\,\omega_i \end{cases}$$

Equações Algébricas

$$\begin{cases} Pe_i = -\,C_i\,f_i + D_i\,e_i \\ PCA = \sum\limits_{j \in N} (\,Pm_j - Pe_j) \\ C_i \triangleq E_i\,B_i\,\cos(\theta_i) \\ D_i \triangleq E_i\,B_i\,\mathrm{sen}(\theta_i) \\ e_i = \sum\limits_{k \in N} [\,R_{ik}\,D_k + X_{ik}\,C_k\,] \\ f_i = \sum\limits_{k \in N} [-\,R_{ik}\,C_k + X_{ik}\,D_k\,] \end{cases}$$

$i \in N$.

2.3. Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o modelo do sistema (modelo clássico), cujo estado encontra-se referido ao centro de ângulos e no qual as interações entre as máquinas síncronas e a rede são efetuadas considerando a preservação da topologia da rede, de acordo com esquema proposto por Fonseca & Decker [19]. Visa-se, assim, a redução do tempo de cálculo e melhor eficiência computacional, em comparação à formulação por redução às barras internas de geração.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

3.1. Introdução

A análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica consiste no diagnóstico dos efeitos de perturbações que causam grandes impactos, *e.g.*, saída de equipamentos elétricos de operação, curto-circuitos, etc.

Esta análise é convencionalmente efetuada através da solução numérica (simulação) das equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema e posteriormente pelo exame das curvas obtidas. Este procedimento não impõe restrições quanto à complexidade do modelo empregado. Contudo, sua aplicação limita-se aos estudos de natureza "off-line". Isto se deve ao tempo de cálculo elevado, bem como à necessidade da participação do usuário no processo de análise. O método direto de Liapunov fornece diretamente o diagnóstico da estabilidade dispensando a análise de suas equações diferenciais.

Neste trabalho, a análise de estabilidade será efetuada utilizando-se uma função de Liapunov, adotada como sendo a função energia do sistema. A conclusão sobre a estabilidade é efetuada comparando-se a energia adquirida durante o transitório com uma energia crítica. A energia crítica é a máxima energia que o sistema pode acumular tal que sua estabilidade é preservada. Neste trabalho a energia crítica é determinada através do método SLEP (Fonseca & Decker [19]).

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos básicos da análise de estabilidade pelo método direto de Liapunov, com o objetivo de auxiliar a compreensão do texto. Em seguida, serão apresentados os conceitos de função energia, margem de segurança e por fim a concepção básica do método SLEP será objeto de estudos.

3.2. Estudos de Estabilidade Transitória em Sistemas de Energia Elétrica Pelo Método Direto de Liapunov

Os Sistemas de Energia Elétrica apresentam um modelo proeminentemente não-linear. Em particular, as equações diferenciais associadas (2.2.2) não podem ser resolvidas de modo analítico. Neste caso, os estudos de estabilidade são feitos, usualmente, por simulação numérica e pela análise da evolução da posição angular de cada máquina ao longo do tempo.

Conforme mencionado previamente, o método Direto de Liapunov constitui-se numa alternativa eficiente de análise considerando tempo de cálculo e qualidade das soluções apresentadas.

Assim sendo, a seguir são apresentados os conceitos básicos do Método Direto de Liapunov, os quais serão úteis à compreensão do texto.

O sistema (2.2.2) correpondente a um sistema descrito por equações diferenciais da forma

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \qquad (3.3.1)$$

onde:

$\mathbf{f(x)}$ representa uma função vetorial, cujas componentes representam não-linearidades, que satisfazem as condições de Lipschitz (Vidyasagar [47]), no sentido de assegurar a existência, unicidade e prolongabilidade das soluções até $+\infty$.

O sistema (3.3.1) representa um sistema livre, e $\mathbf{x}^e$ será denominado estado de equilíbrio se, e somente se, $\mathbf{f(x^e)} = \mathbf{0}$.

Definição 1. Define-se $\mathbf{x} = \mathbf{x}o$ como sendo o estado inicial ou condição inicial para a evolução de uma solução de (3.3.1).

Existe na literatura especializada, um número considerável de diferentes definições de estabilidade para sistemas descritos por (3.3.1). A seguir, apresentam-se as definições mais importantes e empregadas em análise de estabilidade em Sistemas de Enegia Elétrica.

Se $\mathbf{x}^e \neq \mathbf{0}$, pode-se definir uma mudança de variáveis:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^e$$

onde:

$$\dot{\mathbf{y}} = \dot{\mathbf{x}}$$

Assim, tem-se:

$$\mathbf{f(x)} = \mathbf{f(y + x^e)}.$$

Neste caso, $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ é um ponto de equilíbrio do sistema

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(\mathbf{y} + \mathbf{x}^e).$$

Como $\mathbf{x}^e$ é também constante, então, pode-se escrever

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(\mathbf{y})$$

que é da forma (3.3.1).

Deste modo, pode-se supor que o ponto de equilíbrio de (3.3.1) é a origem.

Definição 2 Estabilidade no sentido de Liapunov (Casti [09])

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

$$\| \mathbf{y}o \| \leq \xi(\varepsilon) \longrightarrow \| \mathbf{y}(t) \| \leq \varepsilon \text{ para todo } t \geq 0.$$

onde:

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

Definição 3. Estabilidade assintótica (Casti [09])

O estado $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável, se $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ for estável no sentido de Liapunov e se

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

De forma semelhante define-se também instabilidade da seguinte forma:

Definição 4. (Instabilidade)

O estado $\mathbf{y}^e$ é um ponto de equilíbrio instável de (3.3.1) se, dado um número real $\varepsilon > 0$ qualquer, existe $\xi(\varepsilon)>0$, tal que

$$\| \mathbf{y}o \| \leq \xi(\varepsilon) \longrightarrow \| \mathbf{y}(t1)\| > \varepsilon.$$

Definição 5. Função Definida Positiva (Casti [09])

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

(a) $W(0) = 0$

(b) $W(\mathbf{y}) > 0$ para $\mathbf{y} \neq \mathbf{0}$

(c) $W(\mathbf{y}) \longrightarrow \infty$ quando $\mathbf{y} \longrightarrow \infty$, uniformemente em $\mathbf{y}$.

Definição 6. Função Semi-Definida Positiva (Casti [09])

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

(a) $W(0) = 0$

(b) $W(\mathbf{y}) \geq 0 \quad \forall$ para $\mathbf{y} \neq \mathbf{0}$.

Definição 7. Função Definida Negativa (Casti [09])

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

(a) $W(0) = 0$

(b) $W(\mathbf{y}) < 0$ para $\mathbf{y} \neq \mathbf{0}$

(c) $W(\mathbf{y}) \longrightarrow -\infty$ quando $\mathbf{y} \longrightarrow \infty$, uniformemente em $\mathbf{y}$.

Definição 8. Função Semi-Definida Negativa (Casti [09])

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

(a) $W(0) = 0$

(b) $W(\mathbf{y}) \leq 0$ para $\forall\ \mathbf{y} \neq \mathbf{0}$.

Os seguintes teoremas representam condições suficientes para os estudos de estabilidade de sistemas não-lineares e são os fundamentos básicos da teoria de Liapunov.

Teorema 1. Se, para a origem do sistema (3.3.1), existir uma função $V: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}$, definida em $D \subset \mathbb{R}^n$, tal que

(a) $V(\mathbf{y})$ é definida positiva em D

(b) $V(\mathbf{y})$ possui todas as derivadas $\dfrac{\partial V(\mathbf{y})}{\partial y_i}$ contínuas

(c) $\dot{V}(\mathbf{y}) = \left\langle \dfrac{\partial V(\mathbf{y})}{\partial \mathbf{y}}, \mathbf{f}(\mathbf{y}) \right\rangle$ semi-definida negativa em D

então, $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ de (3.3.1) é <u>estável no sentido de Liapunov</u> (Definição 2)

onde:

y_i = i-ésima componente do vetor $\mathbf{y}$

$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle \triangleq$ Produto interno de **a** e **b**, $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$

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

<u>**Teorema 2**</u>. Se, para a origem do sistema (3.3.1), existir uma função $V: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}$, definida em $D \subset \mathbb{R}^n$, tal que

(a) $V(\mathbf{y})$ é definida positiva em D

(b) $V(\mathbf{y})$ possui todas as derivadas $\dfrac{\partial V(\mathbf{y})}{\partial y_i}$ contínuas

(c) $\dot{V}(\mathbf{y}) = \left\langle \dfrac{\partial V(\mathbf{y})}{\partial \mathbf{y}}, \mathbf{f}(\mathbf{y}) \right\rangle$ definida negativa em D

então, $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ de (3.3.1) é <u>assintoticamente estável</u> (definição 3).

As funções que satisfazem as condições do teorema 1 ou 2 são chamadas de <u>funções de Liapunov.</u>

O método direto de Liapunov foi concebido originalmente a partir da observação de que a razão de decaimento da energia total do sistema pode ser interpretada como um indicativo de sua estabilidade. Assim, as funções de Liapunov são uma generalização da função energia.

Devido à natureza não-linear dos Sistemas de Energia Elétrica e, portanto à existência de vários pontos de equilíbrio, nem todas condições iniciais **yo** definem soluções **y**(t) estáveis segundo as definições 2 ou 3. Deste modo, surge a necessidade de se definir <u>domínio de estabilidade</u> como sendo o conjunto aberto de condições iniciais que definem soluções estáveis.

Por conseguinte, a análise de estabilidade do Sistemas de Energia Elétrica pelo método direto de Liapunov cujo comportamento dinâmico é descrito pelo modelo (2.2.2), consiste na geração de uma função de Liapunov e, a partir desta, na determinação de um domínio de estabilidade. Então, dada uma condição inicial qualquer (**yo**), calcula-se o valor da função de Liapunov neste ponto (V(**yo**)) e, em seguida, conclui-se sobre a estabilidade, do ponto de vista transitório, mediante o seguinte critério:

(i) Se $V(\mathbf{yo}) < V(\mathbf{y}^{*})$, conclui-se pela estabilidade do ponto de equilíbrio e,

(ii) Se $V(\mathbf{yo}) \geq V(\mathbf{y}^{*})$, conclui-se pela instabilidade,

onde:

$V(\mathbf{y}^{*})$ é determinada através da solução do problema de programação não-linear:

$$\begin{aligned} &\text{Min} \quad V(\mathbf{y}) \\ &\text{s.a} \quad \dot{V}(\mathbf{y}) = 0 \end{aligned} \qquad (3.3.2)$$

onde:

y^* é a solução do problema (3.3.2). Esta solução especifica um domínio de estabilidade como:

$$\mathbb{D} = \{ \mathbf{y} \mid V(\mathbf{y}) < V(\mathbf{y}^*) \} \tag{3.3.3}$$

3.4. Função Energia

Neste trabalho, utilizar-se-á uma função tipo energia total do sistema como função de Liapunov. Deve-se ressaltar que, com a presença das condutâncias de transferência, o segundo membro das equações (2.2.2) não se caracteriza como força potenciais e, conseqüentemente não será possível se determinar uma função **energia potencial do sistema**. Contudo, por abuso de linguagem, o termo **energia total do sistema** será empregado sempre que houver referência à função tipo energia.

A energia total associada ao sistema (2.2.2) é composta pela soma das energias cinética e potencial (Fonseca & Decker [19]):

$$E(\theta,\dot{\theta}) = Ec(\dot{\theta}) + Ep(\theta), \tag{3.4.1}$$

onde:

$$Ec(\dot{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i \in N} Mi\dot{\theta}i^2 \tag{3.4.2}$$

$$Ep(\theta) = - \sum_{i \in N} \int_{\theta i^p}^{\theta i} gi(\theta)\, d\theta i \tag{3.4.3}$$

O superscrito (p) denota o estado de equilíbrio pós-defeito e

$$gi(\theta) \triangleq Pmi - Pei - \frac{Mi}{MT} PCA \qquad (3.4.4)$$

Em vista da propriedade das coordenadas do centro de ângulos (equação (2.2.4)), a função energia pode ser expressa por

$$E(\theta,\dot{\theta}) = Ec(\dot{\theta}) - \sum_{i \in N} Pmi(\theta i - \theta i^{p}) + \sum_{i \in N} \int_{\theta i^{p}}^{\theta i} Pei(\theta)\, d\theta i \qquad (3.4.5)$$

Nota-se que, a energia total (3.4.5) não sofre influência direta de PCA, isto porque

$$\sum_{i \in N} \frac{Mi}{MT} PCA\, \dot{\theta} i = \frac{PCA}{MT} \sum_{i \in N} Mi\, \dot{\theta} i = 0 \qquad (3.4.6)$$

A função energia em (3.4.5) contém uma integral que é dependente do caminho de integração em função das condutâncias de transferência. Existem basicamente três alternativas para a solução deste problema:

(i) Desconsiderar as condutâncias de transferência no modelo. Isto implica na introdução de erro na solução encontrada, o qual é crescente com o aumento do carregamento do sistema. Para tornar o modelo consistente, são necessários alguns ajustes no modelo, para assim, restabeler a condição de equilíbrio do sistema

(Ribbens-Pavella & Evans [41]), através da correção na potência mecânica de entrada. Alternativamente, esta potência pode ser mantida constante, porém, é necessário se calcular um novo ponto de equilíbrio do sistema sem condutâncias de transferência (Fonseca [18]).

(ii) Adotar formas aproximadas para a referida integral, cujas principais proposições encontradas são:

(a) Consideração somente de uma parte das condutâncias de transferência, justamente aquelas que permitem agrupar termos da função energia que podem ser integrados (Magnusson [32], Aylett [04], El-Guindi & Mansour [16] & Pai & Varwandkar [39]);

(b) O efeito das condutâncias de transferência é incluido utilizando uma técnica de análise de perturbações (Kitamura *et al.* [28]);

(c) O caminho de integração é assumido como linear. Assim, a integral pode ser determinada, por exemplo, via integração trapezoidal (Athay *et al.* [02], Fouad & Stanton [25]);

(iii) Avaliar a integral à medida que se conhece a evolução dos ângulos e velocidades das máquinas (Fonseca & Decker [19]). O caminho de integração entre dois pontos quaisquer sobre a trajetória do sistema é conhecido. Portanto, a integral é facilmente determinada.

Neste trabalho, será adotada a função energia, calculada de acordo com a alternativa **(iii)**, pois esta formulação não introduz erro na solução.

A função energia (3.4.1) assim avaliada tem sido tratada pela literatura como uma função de Liapuvov na vizinhança do ponto de equilíbrio estável (Athay *et al.* [02], Fonseca & Decker [19]).

3.5. Margem de Segurança

A Margem de Segurança associada à n-ésima contingência pode ser interpretada como sendo uma "medida" da distância em relação à condição de instabilidade do sistema, sendo definida por (Fouad & Stanton [25], Fonseca & Decker [19]):

$$\mathcal{M}_n \triangleq \frac{(Ecrit_n - Ee_n)}{Ecrit_n} \qquad (3.5.1)$$

onde:

n = Índice da contingência sob análise

Ee_n = Energia do sistema, correspondente ao tempo da eliminação do defeito (para faltas tipo curto-circuito)

$Ecrit_n$ = Energia crítica.

A energia crítica ($Ecrit_n$), assim como o tempo crítico (tcrit) serão determinados via método SLEP, cuja descrição encontra-se na seção (3.6).

Então, a estabilidade do sistema para a contingência $\mathcal{r}$, será avaliada via margem de segurança mediante o seguinte critério:

- Se $\mathcal{M}_r > (\leq) 0$, o sistema associado à r-ésima contingência é considerado estável (instável).

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

Em função do que será discutido a seguir, é conveniente apresentar as seguintes definições:

Definição 8. Margem de segurança do sistema (Fonseca *et al.* [24]). Margem de segurança do sistema é definida como sendo

$$\mathbb{M} \triangleq \operatorname*{Min}_{r} \{\mathcal{M}_r\} \qquad (3.5.2)$$

Definição 9. Define-se contingência crítica aquela contingência em que o sistema apresenta margem de segurança inferior a um valor mínimo permissível ($\mathcal{M}_{min}$).

3.6. Método SLEP

A seguir, apresenta-se a concepção básica do método SLEP. O método considera o modelo clássico com preservação da topologia da rede, conforme mostrado na seção (2.2).

A opção pelo método SLEP deve-se aos seguintes fatores:

1). Não é efetuada a redução às barras internas de geração, por conseguinte, os resultados apurados encontram-se em função de parâmetros, variáveis e topologia da rede original;

2). O tempo de cálculo necessário para a obtenção do modelo é consideravelmente pequeno (Fonseca & Decker [19]), se comparado à formulação convencional (redução às barras internas);

3). Aproveitamento da metodologia já implantada, com soluções compatíveis àquelas obtidas por simulação, não se tendo disponível na literatura especializada outro método com superior desempenho, do ponto de vista do tempo de cálculo e qualidade das soluções (vide comparações entre os principais métodos em Fonseca *et al.* [20]).

A derivada direcional da energia potencial é expressa por (Athay *et al.* [03], Pai [38], Fonseca & Decker [19])

$$\mathcal{D}(\theta) = - \frac{1}{\| \theta - \theta^{p} \|_{e}} < \mathbf{g}(\theta) \; , \; (\theta - \theta^{p}) > \qquad (3.6.1)$$

onde:

$\mathbf{g}(\theta) = [\ g_1(\theta)\ g_2(\theta)\ \ldots\ g_n(\theta)]^T$

θ = Vetor posição angular das máquinas síncronas referida ao centro de ângulos

θ^p = Vetor posição angular das máquinas síncronas referida ao centro de ângulos e relativa ao estado de equilíbrio pós-defeito

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

<u>**Definição 10.**</u> Define-se <u>superfície limite de energia potencial (SLEP)</u> (Fonseca & Decker [19]) aos 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 do ponto de equilíbrio.

A definição 10 equivale à ortogonalidade dos vetores $\mathbf{g}(\theta)$ e $(\theta - \theta^p)$. Note-se que qualquer ponto de equilíbrio satisfaz a condição $\mathcal{D}(\theta) = 0$. Daí a necessidade de se excluir, na definição 10, o ponto de equilíbrio estável associado à mínima energia potencial, em relação ao qual se deseja estudar a estabilidade. Deste modo, a SLEP representa os pontos de máximos direcionais da energia potencial, que circundam o ponto de equilíbrio estável. Geometricamente pode-se ser interpretada como sendo o conjunto de pontos que constituem o divisor de águas que circunda o ponto de equilíbrio.

<u>**Definição 11.**</u> Define-se <u>trajetória do sistema</u> como sendo o conjunto de pontos dado por :

$$\mathbb{T} = \{[\theta(t),\ \dot{\theta}(t)]^T \mid t \geq 0,\ \theta(t) = [\theta_1(t)\ \theta_2(t)\ \dots\ \theta_n(t)]^T,$$
$$\dot{\theta}(t) = [\dot{\theta}_1(t)\ \dot{\theta}_2(t)\ \dots\ \dot{\theta}_n(t)]^T\}.$$

Propriedade 4. A derivada direcional $\mathcal{D}(\theta)$ possui a propriedade de se manter sempre positiva para trajetórias estáveis (Athay *et al.* [03], Fonseca & Decker [19]).

Isto decorre do fato da função energia potencial ser definida positiva na vizinhança do equilíbrio estável pós-defeito.

Da propriedade 4 conclui-se que o sistema estará sujeito às seguintes situações:

(i) $h(\theta) < 0$ Ponto da trajetória "interior" à SLEP

(ii) $h(\theta) = 0$ Ponto da trajetória de interseção com a SLEP (definição 10)

(iii) $h(\theta) > 0$ Ponto da trajetória "exterior" à SLEP

onde:

$$h(\theta) = < \mathbf{g}(\theta)\ ,\ (\theta - \theta^P) > . \tag{3.6.2}$$

Deste modo, a função $h(\theta)$ pode ser utilizada como um mecanismo de análise de estabilidade, particularmente na determinação do tempo crítico/energia crítica, como proposto por Kakimoto *et al.* [51],Fonseca & Decker [19]).

O método SLEP (Fonseca & Decker [19]) 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. Isto pode ser efetuado tomando-se duas estimativas da energia crítica: a primeira sendo designada como energia crítica pessimista e a outra como energia crítica otimista. Entende-se por energia crítica pessimista (otimista), a energia total do sistema (2.2.2) alcançada por um ponto sobre a trajetória durante defeito que determina uma trajetória pós-defeito estável (instável). É importante salientar que, a energia total do sistema se mantém constante durante a evolução pós-defeito.

Inicialmente, arbitra-se a energia pessimista igual a zero e a otimista como sendo idêntica à energia potencial máxima com a falta mantida, *i.e.*, correspondente a $h(\theta) = 0$. Uma nova estimativa é, então, determinada tomando-se a média aritmética entre as duas estimativas. O processo é repetido até que a "distância" entre tais energias satisfaça uma tolerância pré-especificada.

Pode ocorrer em alguns casos que a primeira estimativa da energia crítica (supostamente otimista) não seja otimista. Neste caso, o método propõe que se arbitre uma nova energia, cerca de 25% (fixado em função da experiência com simulações) maior que a anterior, iterando-se até que uma energia otimista seja encontrada. A partir daí, retorna-se ao procedimento anterior.

No processo de cálculo pode ser necessário se gerar várias trajetórias até que a solução seja finalmente obtida, considerando um período de observação em torno de 1s (por exemplo, por se tratar da estabilidade de primeira oscilação). Estas trajetórias são determinadas via aproximações, por séries de Taylor, com coeficientes atualizados com freqüência que depende da precisão requerida, ordem da aproximação e do tipo de trajetória (sob ou pós-defeito, isto porque a trajetória sob defeito segue um comportamento aproximadamente quadrático, enquanto que a trajetória pós-defeito é oscilatória). Estes coeficientes são calculados de forma recursiva, representando um custo computacional inferior à integração numérica das equações diferenciais.

As soluções assim determinadas, em termos de precisão, são comparáveis àquelas obtidas por simulação numérica (vide referência Fonseca & Decker [19], Fonseca *et al.* [20]).

O algoritmo computacional completo do método SLEP encontra-se no Apêndice A.

3.6. Conclusão

Neste capítulo foram incluídas algumas definições e conceitos, visando apresentar a função energia como função de Liapunov. O uso de domínios de estabilidade permite a definição de margens de segurança, úteis à análise de estabilidade transitória. Neste sentido, foi apresentado de forma sucinta o método SLEP para o cálculo de energias, de tempos críticos e determinação das margens de segurança dinâmica. Dispondo destas margens, pode-se definir o problema do **controle** ou **correção de segurança dinâmica**, baseado na análise de sensibilidade, conforme apresentação no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 4

CONTROLE DE SEGURANÇA DINÂMICA

4.1. Introdução

Perturbações do tipo saída de equipamento, curto-curcuito, etc., podem provocar a perda de estabilidade do sistema. Assim, deve-se analisar previamente o desempenho do sistema considerando uma lista de contingências pré-especificada. Se verificada violação na sua segurança, faz-se necessário efetuar alterações no sistema visando a eliminação ou, pelo menos, a atenuação de seus efeitos. Esta atividade é definida como Controle ou Correção de Segurança e corresponde ao controle preventivo segundo os esquemas propostos por Dy Liacco [14], Ribbens-Pavella *et al.* [42], Talukdar & Wu [45], Stott *et al.* [43] para o controle do sistema em tempo real. De modo similar, devem ser previstos esquemas para atendimento de determinado nível de segurança dinâmica na atividade de planejamento de sistemas elétricos.

A correção de segurança, considerando critérios estáticos, tem sido investigada há algum tempo e atualmente existe um número considerável de trabalhos que tratam do assunto (LaCarna & Johnson [29], Stott *et al.* [43], Stott & Marinho [44], Talukdar & Wu [45] e outros). Entretanto, do ponto de vista de segurança dinâmica, o mesmo não ocorre, em vista da maior complexidade do problema e pouca disponibilidade de resultados.

Na verdade, somente há pouco tempo tem sido dada atenção a este problema.

Neste capítulo, o problema do controle de segurança dinâmica será discutido, apresentando-se um resumo do estado da arte.

4.2. Apresentação do Problema do Controle de Segurança Dinâmica

O problema do Controle da Segurança Dinâmica, associado ao critério da margem de segurança, conforme proposto neste trabalho, pode ser apresentado de forma geral do seguinte modo:

Problema. Supondo-se que, para uma lista de S contingências analisadas, encontram-se R contingências para as quais o sistema é caracterizado como inseguro, *i.e.*, $\mathcal{M}i \leq \mathcal{M}\mathrm{min}$, $i=1,2,\ldots,R$, $R \leq S$. Então, Para conduzí-lo ao estado seguro, devem-se impor ações de controle tais que se obtenha

$$\mathbb{M} \geq \mathcal{M}\mathrm{min} \quad , \tag{4.2.1}$$

onde:

$\mathbb{M}$ é a Margem mínima do sistema (Definição 8).

As ações de controle ocasionam modificações $\Delta\mathcal{M}i$ nas margens de segurança de modo que as seguintes relações devem ser observadas

$$\mathcal{M}i^{0} + \Delta\mathcal{M}i \geq \mathcal{M}_{\mathrm{min}} \quad , i=1,2,\ldots,R \tag{4.2.1}$$

onde:

$\mathcal{M}i^{o}$ = Margem de segurança do sistema referente à i-ésima contingência

$\mathcal{M}_{min}$ = Margem de segurança mínima permissível ($\mathcal{M}_{min} \geq 0$).

Deste modo, resolver o problema do controle da segurança significa determinar as ações de controle que modifiquem de $\Delta\mathcal{M}$ a margem de segurança.

Para a solução do problema de controle da segurança dinâmica, os pontos abaixo são elementos determinantes do sucesso nesta busca:

- **Contingências consideradas**
- **Método de análise da estabilidade transitória**
- **Critério que mede o grau de estabilidade do sistema**
- **Ações principais para controle da segurança:**
    - Remanejamento da geração
    - Modificação da topologia da rede
    - Modificação do perfil de tensões
    - Alívio de carga.

4.3. Estado da Arte

Nesta seção, apresentam-se os principais métodos de controle da segurança dinâmica encontrados na literatura. Tais métodos surgiram recentemente e portanto o número de referências disponíveis é ainda reduzido.

Os métodos analisados serão apresentados por ordem cronológica de publicação. Caso estes métodos não possuam nomes específicos, serão atribuídos aos autores.

4.3.1 Método Fonseca et al. [21]

A análise de estabilidade transitória é efetuada através do método direto de Liapunov, e domínios de estabilidade são calculados através do método de politopo (Doraiswami & Fonseca [15]). A margem de segurança utilizada é a mesma da equação (3.5.1), porém não se encontra normalizada. Considerando-se contingências tipo saída de linha de transmissão, é desenvolvido um modelo incremental através de análise de sensibilidade, representando a correção necessária para a obtenção de uma nova margem, dentro de níveis considerados seguros. O modelo incremental é descrito em função de acréscimos no vetor de injeção de potência ativa nodal, cuja solução é encontrada por programação linear, de modo a minimizar o desvio em torno do ponto nominal de operação. A solução encontrada representa o redespacho da geração e/ou alívio de carga, caso seja necessário.

O método do politopo é baseado na seguinte concepção:

Considerando-se a dinâmica do sistema dada por (2.2.1) e desprezadas as condutâncias de transferência e amortecimentos, uma função de Liapunov (energia) pode ser expressa após translação do equilíbrio para a origem por (Doraiswami & Fonseca [15]):

$$V = 1/2 \sum_{i \in N} M_i \dot{\delta}_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-2} F_{ij}[-\cos(Z_{ij}+\delta_{ij}^p)+\cos\delta_{ij}^p+$$
$$Z_{ij} \text{ sen } \delta_{ij}^p]+ \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} [-\cos(Z_i+\delta_i^p)+\cos\delta_i^p-Z_i \text{ sen}\delta_i^p] \quad , \tag{4..3.1.1}$$

onde:

$$Z_i \triangleq \delta_i - \delta_i^p$$

$$F_{ij} \triangleq B_{ij} E_i E_j$$

sendo B_{ij} a susceptância de transferência entre a i e j-ésimas máquinas síncronas, relativa à matriz de admitância reduzida às barras internas de geração.

Esta função é válida como função de Liapunov na região(Doraiswami & Fonseca [15])

$$L2 = \{\delta \mid (-\pi-2\delta i^{P}) \le Zi \le (\pi-2\delta i^{P}),$$
$$(-\pi-2\delta ij^{P}) \le Zij \le (\pi-2\delta ij^{P})\} \qquad \text{para} \quad i,j = 1,2,\dots,n-1 \tag{4.3.1.2}$$

Um domínio de estabilidade pode ser determinado, resolvendo-se o seguinte problema (Doraiswami & Fonseca [15])

$$\begin{aligned} &\text{Min} \quad Ep(\mathbf{Z}) \\ &\text{s.a} \quad \mathbf{Z} \in \partial L2 \end{aligned} \tag{4.3.1.3}$$

onde:

$$Ep(\mathbf{Z}) = V - \frac{1}{2} \sum_{i \in N} Mi\dot{\delta}i^{2}$$

$\partial L2$ = É a fronteira da região L2. O domínio de estabilidade $\mathbb{D}$ é dado por:

$$\mathbb{D} = \{\mathbf{Z} \mid V(\mathbf{Z}) < Ep(\mathbf{Z}^{*})\} \tag{4.3.1.4}$$

sendo:

$\mathbf{Z}^{*}$ = é a solução do problema de otimização (4.3.1.3).

A principal crítica feita a este procedimento consiste na conservatividade dos resultados da análise de estabilidade, quando se aumenta a ordem do sistema, embora o resultado encontrado seja garantidamente um domínio de estabilidade. Além disso consideram-se apenas contingências do tipo saída de operação de equipamentos, não se incluindo curto-circuito.

4.3.2 Método MESEGT

Os fundamentos do método MESEGT (Melhoria de Segurança) encontram-se na referência Fonseca *et al.* [24]).

A correção de segurança dinâmica é efetuada através do aumento do domínio de estabilidade (4.3.1.4). Para se "aumentar" o domínio de estabilidade é necessário "aumentar" a superfície de nível de energia potencial, contida na região L2 (4.3.1.2). Neste sentido, deve-se proceder à diminuição do ângulo entre uma máquina e a referência ou entre duas máquinas. os índices destas máquinas são apontados pela face onde ocorreu a tangência. Estes índices são utilizados como indicadores onde devem ser efetuadas as alterações na potência mecânica das máquinas. A parcela de geração retirada deverá ser alocada em outras unidades geradoras de modo a manter o balanço de potência.

As contingências são consideradas como sendo saídas de linhas de operação e valem as críticas anteriores.

4.3.3 Método Chandrashekar & Hill [12,13]

Os autores apresentam um método de redespacho em segurança baseado nos fundamentos de análise de estabilidade transitória do modelo de Bergen & Hill [05]. Este modelo preserva a topologia da rede (sem redução às barras internas de geração), e com sua utilização são desenvolvidos fatores de distribuição que podem orientar a obtenção da melhoria da estabilidade transitória, através da variação de potências e tensões nodais. O método consiste em se obter um novo ponto de equilíbrio, tal que o corte vulnerável seja menos crítico. O corte representa um conjunto de linhas do sistema de transmissão que, se removidas, dividem um grafo conexo em dois subgrafos conexos. O termo vulnerável é utilizado para indicar que o referido corte é o mais crítico do ponto de vista da estabilidade transitória. Com isto aumenta-se o domínio de estabilidade e, como conseqüência, a margem de segurança será melhorada.

A análise da estabilidade neste método depende de procedimentos que dão resultados conservativos, embora apresente como vantagem a não redução às barras internas. As contingências consideradas são do tipo curto-circuito.

4.3.4 Método MESEGF

A descrição deste método encontra-se na referência Cabreira [08] e representa uma extensão do método de Fonseca *et al.* [21], sendo incluídas restrições relativas a várias contingências, e o problema de programação linear associado é tratado em sua formulação dual.

A solução do problema de programação linear fornece um vetor de acréscimos ao vetor de geração. Não havendo solução viável, são incluídas parcelas negativas associadas ao corte de carga necessário para a existência da solução. As contingências consideradas são também do tipo saída de linhas de transmissão, e a análise da estabilidade transitória depende do método do politopo, implicando, portanto, em resultados conservativos.

4.3.5 Método El Kady et al. [17]

A correção de segurança dinâmica é formulada através da margem de segurança não-normalizada, expressa em função do fluxo de potência em determinado ponto da rede, *e.g.*, o intercâmbio entre áreas. Este método tem por objetivo a determinação do máximo fluxo, correspondente à margem de segurança igual a zero, ou seja, a determinação do fluxo crítico. Para se conseguir tal objetivo, varia-se a geração do sistema em torno do estado nominal, através do uso de fatores de distribuição gerados pela análise de sensibilidade. Assim, o fluxo é monitorado durante a operação do sistema e comparado com o máximo fluxo, dando ao operador a noção de quão distante se encontra a operação do seu estado crítico. Caso seja necessário, medidas podem ser tomadas no sentido de se proceder a devida correção de segurança.

As dificuldades no uso deste procedimento residem na necessidade do cálculo do máximo fluxo, o que deve ser feito para vários pontos da rede e para cada contingência, demandando grande esforço computacional. As contingências consideradas são do tipo curto-circuito.

4.3.6 Método Xue et al. [49]

Este método está baseado no modelo do sistema representado por um equivalente composto por máquina síncrona contra a barra infinita, ou seja, o conjunto de máquinas críticas será representado por uma máquina equivalente, enquanto que, as demais máquinas representam um equivalente de barra infinita. Considerando-se um modelo assim definido, os autores desenvolveram um método para o cálculo da sensibilidade de segunda ordem considerando o critério de igualdade de áreas com relação à diversos parâmetros do sistema equivalente, permitindo-se, assim, formular a correção de segurança dinâmica. O artigo apresenta ainda um algoritmo para seleção das máquinas críticas.

Neste caso, a qualidade das soluções encontradas depende, entre outros fatores, da identificação exata do grupo de máquinas críticas o que, a rigor, só é possível através de simulações considerando a situação pós-defeito. O desempenho desta metodologia e também de outras, foi objeto de análise na referência Fonseca *et al.* [20], considerando o sistema elétrico Sul-Brasileiro. Desta análise ficou evidente que os resultados fornecidos por com este método nem sempre são satisfatórios, uma vez que não se considera a situação pós-defeito na determinação do tempo crítico. Mesmo admitindo-se o conhecimento das máquinas que efetivamente perdem o sincronismo, poder-se-á estar diante de situações contraditórias visto que as máquinas críticas, para o cálculo do domínio de estabilidade (condição limite) não são necessariamente as mesmas máquinas associadas às trajetórias que começam sobre a trajetória de defeito no instante da eliminação do defeito, quando este é maior que o tempo crítico.

Este mesmo procedimento foi também abordado na referência

Xue & Ribbens-Pavella [50], onde foram incluídos novos testes. Nestes dois trabalhos, após ter sido efetuada a correção de segurança dinâmica considerando-se o modelo equivalente, são feitos testes para confirmação dos resultados sobre modelo não-linear equivalente, e não sobre o sistema original.

A metodologia apresentada na referência Lemmon *et al.* [30] é similar à técnica discutida acima, portanto valendo as mesmas observações.

4.3.7 Método MESEGM

O método MESEGM (Fonseca & Minussi [22]) é também uma extensão do método de Fonseca *et al.* [21], porém neste caso, as contingências são consideradas do tipo curto-circuito. A análise de estabilidade transitória é efetuada através do método direto de Liapunov com domínios de estabilidade, calculados pelo método do politopo (Doraiswami & Fonseca [15]). Observa-se que as referências analisadas nas sub-seções (4.3.1),(4.3.2), (4.3.4) e nesta, apresentam resultados considerados satisfatórios, embora o método do politopo utilizado proporcione soluções conservativas, se comparado às metodologias mais recentes. Por outro lado, o método de politopo caracteriza-se pela facilidade do cálculo de sensibilidade e tempo de cálculo relativamente reduzido para indicação das alterações na geração do sistema visando melhoria da segurança.

4.3.8. Método Vittal et al. [48]

Este método utiliza, basicamente, os seguintes recursos: função de Liapunov tipo energia avaliada supondo-se caminho de integração linear de acordo com proposição de Athay *et al.* [02]; energia cinética baseada em um equivalente máquina síncrona contra a barra infinita ; determinação da energia crítica considerando pontos de equilíbrio instáveis; cálculo de sensibilidade da margem de segurança não normalizada.

O cálculo da sensibilidade é feito considerando-se parâmetros associados a um conjunto de máquinas pré-definidas. Isto quer dizer que o redespacho de geração é associado previamente a um certo conjunto de máquinas que deverão participar da ação de controle. Cabe ressaltar que a obtenção da sensibilidade com relação à cada parâmetro requer, além de outros cálculos, a inversão de uma matriz de ordem n. Portanto este procedimento torna-se oneroso caso se deseje utilizar o redespacho de geração considerando todas as máquinas do sistema e um conjunto de muitas contingências.

A determinação da energia crítica via pontos de equilíbrio instáveis não considera o comportamento transitório pós-defeito e, deste modo, poderá levar à obtenção de resultados conservativos para sistemas multi-máquinas, conforme pode-se observar nos resultados apresentados nas referências mais atuais (Athay *et al.* [03], Ribbens-Pavella *et al.* [42], Pai [38], Fonseca & Decker [19] e outros.

4.5. Conclusão

Neste capítulo foi efetivada a análise crítica com relação às principais técnicas de controle de segurança dinâmica encontradas na literatura. Entre tais técnicas nota-se, nitidamente, a existência de três grupos de metodologias para o controle da segurança dinâmica, a saber: o primeiro grupo composto pelas referências Fonseca *et al.* [21] e [24], Cabreira [08] e Fonseca & Minussi [22] com desenvolvimentos baseados no método do politopo (Doraiswami & Fonseca [15]). A principal limitação destes métodos refere-se à conservatividade dos resultados dos domínios de estabilidade calculados, mas é garantida a obtenção de uma solução. No segundo grupo, encontram-se as referências Chandrashekhar & Hill [13] e Chandrashekhar [12], as quais originaram-se a partir do modelo com preservação da topologia da rede, segundo formulação estabelecida por Bergen & Hill [08] sendo também técnicas que fornecem domínios de estabilidade conservativos. Por fim, encontram-se as referências Xue *et al.* [49], Xue & Ribbens-Pavella [50] e Lemmon *et al.* [30], desenvolvidas com base no modelo equivalente a uma máquina contra barramento infinito, cujos resultados são ora otimistas, ora pessimistas. Isoladamente, encontram-se as referências El-Kady *et al.* [17] e Vittal *et al.* [48].

As idéias gerais disponiveis na literatura para a solução do problema da correção da segurança, apesar de promissoras, têm como dificuldades principais: a determinação de domínios de estabilidade, a identificação de máquinas críticas, a determinação do ponto de equilíbrio instável de interesse e também a não consideração das trajetórias pós-defeito.

Deste ponto de vista será proposta, no próximo capítulo uma metodologia para o controle de segurança dinâmica, visando explorar resultados recentes em relação à obtenção de margens de segurança dinâmica, baseada no método SLEP iterativo.

CAPÍTULO 5

CONTROLE DE SEGURANÇA DINÂMICA: FORMULAÇÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

5.1. Introdução

O Controle de Segurança Dinâmica pode ser entendido como sendo toda a ação preventiva empregada que resulte na atenuação dos efeitos, do ponto de vista transitório, provocados por perturbações que normalmente ocorrem em Sistemas de Energia Elétrica.

Neste capítulo, a Correção de Segurança Dinâmica será apresentada através do desenvolvimento de relações matemáticas entre a margem de segurança e o vetor posição angular pré-falta. A partir destas relações, podem ser desenvolvidas várias estratégias de deslocamento do ponto de equilíbrio pré-falta do sistema utilizando recursos tais como: Redespacho de geração, alívio de carga, mudança topológica de redes, etc, para melhoria da segurança.

A utilização da sensibilidade da margem de segurança com relação à posição angular pré-falta visa tornar o cálculo unificado considerando as possíveis alternativas de controle, bastando apenas para cada uma das alternativas, efetuar-se uma transformação de variáveis.

Neste trabalho dar-se-á atenção a ações do tipo redespacho de geração para controle de segurança dinâmica.

5.2. Proposta de Solução Para o Problema do Controle de Segurança Dinâmica

Conforme exposto no capitulo anterior, as principais dificuldades atuais para solução do problema da correção da segurança dinâmica residem na análise da estabilidade transitória por um método não conservativo e confiável e na determinação de ações de controle.

Em vista dos bons resultados obtidos com o método SLEP (Kakimoto *et al.* [51], Fonseca & Decker [19], Fonseca *et al.* [20]), quando comparado com outras metodologias e principalmente com simulação numérica, este método será usado para a análise da estabilidade transitória, bem como no cálculo das margens de segurança obtida pela expressão

$$\mathcal{M} = \frac{Ecrit - Ee}{Ecrit}$$

onde:

Ee = Energia total do sistema correspondente ao tempo de eliminação de defeito

Ecrit = Energia crítica total.

As contingências consideradas são do tipo curto-circuito seguido de perda de equipamento.

As ações de controle utilizadas serão, conforme mencionado antes, obtidas através de modificações da geração do sistema.

Um ponto de operação é determinado, normalmente visando-se atender algum critério. Deste ponto de vista procurar-se-á obter correções que modifiquem o mínimo possivel o ponto de operação inicial.

A questão básica que precisa ser resolvida é então a determinação de direções de mudança nas gerações de modo a melhorar a segurança dinâmica do sistema.

Outra questão não menos importante é a determinação de quanto caminhar ao longo desta direção.

Neste sentido é então apresentada uma proposta de cálculo de direção usando-se sensibilidade da margem de segurança. No capítulo seguinte discute-se a questão de quanto caminhar ao longo desta direção.

O problema é essencialmente não-linear e, portanto, de difícil solução. Assim um procedimento que pode ser proposto, consistiria na obtenção de uma direção ao longo da qual se fariam pequenas modificações, revendo-se o cálculo das direções e repetindo-se o processo até que um critério de parada seja atendido.

5.3. Cálculo da Sensibilidade da Margem de Segurança

O problema do controle da segurança dinâmica foi apresentado no ítem (4.2) considerando-se um conjunto de contingências.

Deseja-se corrigir a margem de segurança associada à contingência de indice r onde $\mathcal{M}r \leq \mathcal{M}_{min}$, i.e., sendo caracterizada a insegurança do sistema. Se $\mathcal{M}_{min} \leq 0$ tem-se, neste caso, instabilidade do sistema. Para tornar o sistema seguro, utiliza-se a relação (4.2.2) reescrita de outra forma:

$$\Delta\mathcal{M}r \geq \mathcal{M}_{min} - \mathcal{M}r^{0} \tag{5.3.1}$$

O acréscimo ($\Delta \mathcal{M}r$) necessário à correção da margem de segurança em função da alteração dos ângulos de equilíbrio pré-falta, pode ser estimado através da <u>análise de sensibilidade</u> de primeira ordem, a partir da expansão em série de Taylor da margem de segurança, por

$$\Delta \mathcal{M}r \cong \left< \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}} , \Delta \theta^{a} \right> \qquad (5.3.2)$$

onde:

$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}}$ = Sensibilidade da margem de segurança relativa à posição angular de equilíbrio pré-falta

$\Delta \theta^{a}$ = Acréscimo do vetor de ângulos de equilíbrio pré-falta, referidos ao centro de ângulos.

A equação (5.3.2) representa a mudança da margem de segurança em função da mudança dos ângulos de equilíbrio pré-falta.

A equação da margem de segurança (3.5.1) pode ser reescrita como

$$\mathcal{M}r = 1 - IDr \qquad (5.3.3)$$

onde:

$$IDr \triangleq Eer \;/\; Ecritr \qquad (5.3.4)$$

A sensibilidade de primeira ordem da margem de segurança da r-ésima contingência, em relação à posição angular pré-falta e referida ao centro de ângulos é, então, dada por

$$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}} = - \frac{\partial IDr}{\partial \theta^{a}} \tag{5.3.5}$$

onde:

$$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}_{1}} & \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}_{2}} & \cdots & \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}_{n}} \end{bmatrix}^{T}$$

$$\frac{\partial IDr}{\partial \theta^{a}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial IDr}{\partial \theta^{a}_{1}} & \frac{\partial IDr}{\partial \theta^{a}_{2}} & \cdots & \frac{\partial IDr}{\partial \theta^{a}_{n}} \end{bmatrix}^{T}$$

sendo que o superscrito (a) denota o estado de equilíbrio pré-falta. Então, a sensibilidade da margem de segurança, após algumas transformações, pode ser expressa por:

$$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}} = \frac{IDr \left.\frac{\partial Ecritr}{\partial \theta^{a}}\right|_{(\theta r^{c},\, \omega r^{c})} - \left.\frac{\partial Eer}{\partial \theta^{a}}\right|_{(\theta r^{e},\, \omega r^{e})}}{Ecritr} \tag{5.3.6}$$

onde:

$$\frac{\partial Ecritr}{\partial \theta^{a}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Ecritr}{\partial \theta^{a}_{1}} & \frac{\partial Ecritr}{\partial \theta^{a}_{2}} & \cdots & \frac{\partial Ecritr}{\partial \theta^{a}_{n}} \end{bmatrix}^{T}$$

$$\frac{\partial Eer}{\partial \theta^{a}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Eer}{\partial \theta^{a}_{1}} & \frac{\partial Eer}{\partial \theta^{a}_{2}} & \cdots & \frac{\partial Eer}{\partial \theta^{a}_{n}} \end{bmatrix}^{T}$$

$\left.\frac{\partial(\circ)}{\partial \mathbf{X}}\right|_{\chi} \triangleq$ Derivada parcial de $(\circ)$ com relação a **X** e avaliada em χ

sendo que, os superscritos (c) e (e) representam estados correspondentes ao tempo crítico e ao tempo de eliminação de defeito, respectivamente.

Observa-se que a energia cinética é dependente das velocidades angulares, enquanto que a energia potencial depende de Pm, θ^p, θ^e e ω^e. Porém, todas estas grandezas encontram-se relacionadas com θ^a. Assim, a seguir, buscar-se-á expressar (5.3.6) somente em função de θ^a. O superscrito (p) refere-se ao estado de equilibrio pós-falta.

Para o cálculo de (5.3.6) serão desenvolvidas, inicialmente, as expressões referentes à segunda parcela do numerador de (5.3.6). Então, as componentes dos gradientes são:

$$\left.\frac{\partial Ee_r}{\partial \theta_j^a}\right|_{(\theta_r^e,\ \omega_r^e)} = \left.\frac{\partial Ec_r}{\partial \theta_j^a}\right|_{\omega_r^e} + \left.\frac{\partial Ep_r}{\partial \theta_j^a}\right|_{\theta_r^e} \tag{5.3.7}$$

onde:

$$\frac{\partial Ec_r}{\partial \theta_j^a} = < \frac{\partial Ec_r}{\partial \omega_r} , \frac{\partial \omega_r}{\partial \theta_j^a} > \tag{5.3.8}$$

$$\frac{\partial Ep_r}{\partial \theta_j^a} = < \frac{\partial Ep_r}{\partial Pm} , \frac{\partial Pm}{\partial \theta_j^a} > + < \frac{\partial Ep_r}{\partial \theta_r} , \frac{\partial \theta_r}{\partial \theta_j^a} > + < \frac{\partial Ep_r}{\partial \theta_r^p} , \frac{\partial \theta_r^p}{\partial \theta_j^a} > \tag{5.3.9}$$

sendo:

Ec_r = Energia cinética referente à r-ésima contingência

Ep_r = Energia potencial referente à r-ésima contingência

$$\omega_r = [\ \omega_{1r}\ \ \omega_{2r}\ \ .\ .\ .\ \ \omega_{nr}\ ]^T$$

$$\theta_r = [\ \theta_{1r}\ \ \theta_{2r}\ \ .\ .\ .\ \ \theta_{nr}\ ]^T$$

$$\theta_r^p = [\ \theta_{1r}^p\ \ \theta_{2r}^p\ \ .\ .\ .\ \ \theta_{nr}^p\ ]^T$$

$$Pm = [\ Pm_1\ \ Pm_2\ \ .\ .\ .\ \ Pm_n\ ]^T$$

$$Pe\tau = \left[Pe_1\tau \quad Pe_2\tau \quad . \; . \; . \quad Pe_n\tau \right]^T$$

Para a ultimação do cálculo da sensibilidade da margem de segurança, é necessário conhecer as várias derivadas parciais contidas nas expressões (5.3.8) e (5.3.9), as quais serão tratadas a seguir.

5.3.1. Sensibilidade da Energia Cinética em Relação à Velocidade Angular

Considerando-se a equação da energia cinética (3.4.2), a derivada parcial desta, com relação à velocidade angular é dada por

$$\frac{\partial Ec\tau}{\partial \omega\tau} = \mathrm{Diag}\ (\ M\delta,\ \delta \in N\ )\ \omega\tau \qquad (5.3.1.1)$$

5.3.2. Sensibilidade da Energia Potencial com Relação à Potência Mecânica

Da equação da energia potencial (3.4.3), deduz-se que

$$\frac{\partial Ep\tau}{\partial Pm} = \theta\tau^P - \theta\tau \qquad (5.3.2.1)$$

5.3.3. Sensibilidade da Energia Potencial com relação à Posição Angular

Derivando-se parcialmente a equação (3.4.3) com relação à $\theta\tau$, obtém-se

$$\frac{\partial Ep_r}{\partial \theta_r} = Pe_r - Pm \qquad (5.3.3.1)$$

5.3.4. Sensibilidade da Energia Potencial com relação à Posição Angular Pós-Falta

A partir da equação (5.3.3.1), conclui-se que

$$\frac{\partial Ep_r}{\partial \theta_r^p} = Pe_r^p - Pm \qquad (5.3.4.1)$$

Entretanto, no estado de equilíbrio pós-falta, tem-se

$$Pm_i - Pe_i - \frac{M_i}{MT}\, PCA^p = 0, \quad \forall\ i \in N \qquad (5.3.4.2)$$

onde:

PCA^p é a potência acelerante do centro de ângulos avaliada na condição de equilíbrio pós-falta. Através da propriedade 1 (capítulo 2), tem-se

$$PCA^p = 0 \qquad (5.3.4.3)$$

Portanto, considerando-se os resultados (5.3.4.2) e (5.3.4.3), deduz-se, através de (5.3.4.1), que

$$\frac{\partial Ep_r}{\partial \theta^p} = 0. \qquad (5.3.4.4)$$

5.3.5. Sensibilidade da Potência Mecânica em Relação à Posição de Equilíbrio Pré-Falta

A potência mecânica, expressa em função da posição angular de equilíbrio pré-falta, é dada por

$$Pm_i = Pe_i^a + \frac{M_i}{MT} PCA^a \qquad (5.3.5.1)$$

Pela propriedade 1, tem-se $PCA^a = 0$, portanto,

$$Pm_i = Pe_i^a = - C_i^a \, f_i^{a,a} + D_i^a \, e_i^{a,a} \qquad (5.3.5.2)$$

onde:

C_i, f_i, D_i e e_i são grandezas anteriomente definidas (Capítulo 2) e o superscrito (a,a) indica que a variável associada é avaliada, considerando o estado de equilíbrio pré-falta (θ^a, $\omega^a = 0$) e configuração pré-falta, portanto,

$$\frac{\partial Pm_i}{\partial \theta_j^a} = - \frac{\partial C_i^a}{\partial \theta_j^a} f_i^{a,a} - C_i^a \frac{\partial f_i^{a,a}}{\partial \theta_j^a} + \frac{\partial D_i^{a,a}}{\partial \theta_j^a} e_i^{a,a} + D_i^a \frac{\partial e_i^{a,a}}{\partial \theta_j^a} \qquad (5.3.5.3)$$

As derivadas parciais de e_i e f_i podem ser obtidas a partir das equações (2.2.12) e (2.2.13):

$$\frac{\partial e_i^{a,a}}{\partial \theta_j^a} = R_{ij}^a \frac{\partial D_j^a}{\partial \theta_j^a} + X_{ij}^a \frac{\partial C_j^a}{\partial \theta_j^a} \tag{5.3.5.4}$$

$$\frac{\partial f_i^{a,a}}{\partial \theta_j^a} = - R_{ij}^a \frac{\partial C_j^a}{\partial \theta_j^a} + X_{ij}^a \frac{\partial D_j^a}{\partial \theta_j^a} \tag{5.3.5.5}$$

onde:

$$\frac{\partial C_i^a}{\partial \theta_j^a} = - \delta_{ij} D_i^a \tag{5.3.5.6}$$

$$\frac{\partial D_i^a}{\partial \theta_j^a} = \delta_{ij} C_i^a \tag{5.3.5.7}$$

sendo:

$$\delta_{ij} \triangleq \text{Delta de Kronecker}$$
$$= \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j . \end{cases}$$

Substituindo-se as equações (5.3.5.4) - (5.3.5.7) em (5.3.5.3), obtém-se

$$\frac{\partial Pm_i}{\partial \theta_j^a} = \delta_{ij} [D_i^a f_i^{a,a} + C_i^a e_i^{a,a}] - X_{ij}^a [C_i^a C_j^a + D_i^a D_j^a] + R_{ij}^a [D_i^a C_j^a - C_i^a D_j^a] \tag{5.3.5.8}$$

5.3.6. Sensibilidade da Posição e Velocidade Angulares com Relação à Posição Angular de Equilíbrio Pré-Falta

O estado (θ_i^e, ω_i^e) é determinado através da solução de equações diferenciais (2.2.2), considerando-se a configuração sob defeito e avaliação em te (tempo de eliminação de defeito). A expansão por séries de potências (Taylor) pode ser empregada como um procedimento alternativo de solução destas equações (Ribbens-Pavella et al.[40], Fonseca & Decker [19]). Assim, dados dois instantes distintos, t_{h-1} e t_h, os ângulos e velocidades serão funções somente do tempo, dentro deste intervalo, com coeficientes das séries avaliados em t_{h-1}. Deste modo, os gradientes de θ_i^e e ω_i^e, em qualquer instante poderão ser determinados, derivando-se parcialmente as expressões que definem os coeficientes das séries. Este procedimento será empregado, neste trabalho, conforme mostra-se a seguir.

As expansões por séries de Taylor da posição e velocidade angulares da i-ésima máquina síncrona podem ser expressas por

$$\theta_i(t) = \sum_{q=0}^{\Delta} \overset{(q)}{\theta_i^d} \Big|_{(t_{h-1})} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} + \mathbb{R}\theta_i \qquad (5.3.6.1)$$

$$\omega_i(t) = \overset{(1)}{\theta_i}(t) \qquad (5.3.6.2)$$

para $i \in N$, $t_{h-1} \le t \le t_h$.

onde:

t_{h-1} e t_h = representam, respectivamente, os tempos inicial e final de cada intervalo das expansões

$\left.\overset{(q)}{\theta_i}\right|_{(t_{h-1})}$ = é a q-ésima derivada temporal de θ_i avaliada no instante t_{h-1}

$\mathbb{R}\theta_i$ = Resíduo da série de potência de θ_i considerando a aproximação de ordem α.

O superscrito (d) indica que os coeficientes das séries são calculados considerando a configuração sob defeito.

A precisão destas aproximações (desprezando-se os resíduos) depende de fatores tais como: magnitude do período considerado, ordem das aproximações, nível de carregamento do sistema. Na determinação da trajetória do sistema, via formulação por séries de Taylor, é imperativo avaliar seus coeficientes com freqüência estabelecida através da experiência com simulações.

<u>**Definição 12**</u>. Considerando-se o sistema dinâmico sob a forma mostrada na equação (3.3.1), $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, então, define-se <u>vetor sensibilidade de trajetória</u> (Frank [26]), com relação ao parâmetro $\hbar$, como sendo:

$$\mathcal{S}_j(t,\hbar o) \triangleq \left.\frac{\partial \mathbf{x}(t,\hbar)}{\partial \hbar_j}\right|_{\hbar o_j}$$

onde:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \hbar_j} = \left[\frac{\partial x_1}{\partial \hbar_j} \;\; \frac{\partial x_2}{\partial \hbar_j} \;\; \cdots \;\; \frac{\partial x_n}{\partial \hbar_j} \right]^T .$$

Através de sucessivas aproximações de (5.3.6.1) e (5.3.6.2) é possível determinar uma relação entre o estado (θ_r^e , ω_r^e) e as posições angulares de equilíbrio pré-falta. Do mesmo modo, as sensibilidades associadas, com relação à posição angular pré-falta da j-ésima máquina síncrona, podem ser determinadas através das seguintes equações (desprezados os resíduos)

$$\frac{\partial \theta i(t)}{\partial \theta j^a} = \sum_{q=0}^{\Delta} \frac{\partial \theta i^{(q)\,d}}{\partial \theta j^a} \Bigg|_{(t_{h-1})} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} \qquad (5.3.6.3)$$

$$\frac{\partial \omega i(t)}{\partial \theta j^a} = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \theta i(t)}{\partial \theta j^a} \right] \qquad (5.3.6.4)$$

para $i, j \in N$; $t_{h-1} \leq t \leq t_h$.

Entretanto, antes de se calcular as derivadas parciais acima, é necessário determinar-se os coeficientes das séries.

Assim, da equação (2.2.2), tem-se

$$\overset{(1)}{\theta i} = \omega i \qquad (5.3.6.5)$$

$$\overset{(2)}{\theta i} = Mi^{-1} \left[Pmi - Pei - \frac{Mi}{MT} \sum_{k \in N} (Pmk - Pek) \right. \qquad (5.3.6.6)$$

Portanto, as derivadas temporais de ordens superiores de θi, são

$$\overset{(q)}{\theta i} = - Mi^{-1} \overset{(q-2)}{Pei} + MT^{-1} \sum_{k \in N} \overset{(q-2)}{Pek} \qquad (6.3.6.7)$$

$i \in N \;, \; q = 3, 4, \ldots, \Delta.$

A partir da expressão da potência elétrica (2.2.8), pode-se determinar suas derivadas temporais que, genericamente, são escritas por (Fonseca & Minussi, [23])

$$\overset{(m)}{Pei} = \sum_{q=1}^{m+1} \tau_{(m+1),q} \left[\overset{(m-q+1)}{Di} \; \overset{(q-1)}{ei} - \overset{(m-q+1)}{Ci} \; \overset{(q-1)}{fi} \right] \qquad (5.3.6.8)$$

$i \in N; \;\; m = 1,2,\ldots, (\Delta-2)$

onde:

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

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

As equações (5.3.6.8) são de natureza recursiva, tornando portanto o cálculo mais rápido.

As derivadas temporais de Di e Ci, podem ser determinadas como mostrado abaixo. Sejam

$Ci = Ei\ Bi \cos \theta i$

$Di = Ei\ Bi \operatorname{sen} \theta i$

$i \in N$

então,

$$C_i^{(1)} = - D_i \, \theta_i^{(1)} \qquad (5.3.6.9)$$

$$D_i^{(1)} = C_i \, \theta_i^{(1)} \qquad (5.3.6.10)$$

$i \in N$.

Das equações (5.3.6.9) e (5.3.6.10) pode-se montar o seguinte sistema

$$\mathbf{p}_i^{(1)} = \mathbf{A}_i \, \mathbf{p}_i \qquad (5.3.6.11)$$

onde:

$$\mathbf{p}_i \triangleq [\, D_i \; C_i \,]^T$$

$$\mathbf{A}_i = \theta_i^{(1)} \, \mathbf{I}^*$$

onde: $\mathbf{I}^* \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$

assim, genericamente, tem-se (Fonseca & Minussi [23])

$$\mathbf{P}_i^{(m)} = \sum_{q=1}^{m} \tau_{mq} \, \mathbf{A}_i^{(m-q)} \, \mathbf{p}_i^{(q-1)} \qquad (5.3.6.12)$$

$i \in N$

onde:

$$\mathbf{A}_i^{(m-q)} = \theta_i^{(m-q+1)} \, \mathbf{I}^*$$

As equações (5.3.6.12) são também determinadas de forma recursiva.

Portanto, das equações (5.3.6.12) obtém-se, então,

$$D_i^{(m)} = \sum_{q=1}^{m} \tau_{mq} \; \theta_i^{(m-q+1)} \; C_i^{(q-1)} \tag{5.3.6.13}$$

$$C_i^{(m)} = - \sum_{q=1}^{m} \tau_{mq} \; \theta_i^{(m-q+1)} \; D_i^{(q-1)} \tag{5.3.6.14}$$

$i \in N$.

As equações acima, determinam $D_i^{(m)}$ e $C_i^{(m)}$ de forma recursiva.

Para a conclusão do cálculo das derivadas temporais de θ_i e ω_i, $i \in N$, basta se determinar as derivadas temporais de e_i e f_i a partir das equações (2.2.12) e (2.2.13), respectivamente

$$e_i^{(\ell)} = \sum_{k \in N} [\; R_{ik} \, D_k^{(\ell)} + X_{ik} \, C_k^{(\ell)} \;] \tag{5.3.6.15}$$

$$f_i^{(\ell)} = \sum_{k \in N} [\; - R_{ik} \, C_k^{(\ell)} + X_{ik} \, D_k^{(\ell)} \;] \tag{5.3.6.16}$$

$i \in N$.

sendo:

$D_k^{(\ell)}$ e $C_k^{(\ell)}$ calculados através das equações recursivas (5.3.6.13) e (5.3.6.14).

Os resultados, previamente apresentados, possibilitam a geração de derivadas temporais de ordem genérica, como conseqüência, as séries de potências (5.3.6.3) e (5.3.6.4) podem ser determinadas de modo sistemático para qualquer ordem δ.

Conhecendo-se as expressões para o cálculo dos coeficientes das séries (5.3.6.5) - (5.3.6.7), pode-se determinar as sensibilidades de θ_i e ω_i em determinado instante da trajetória com relação à posição angular θ_j^a. Das equações (5.3.6.8), (5.3.6.9) e (5.3.6.10), obtém-se

$$\frac{\partial \overset{(m)}{Pe_i}}{\partial \theta_j^a} = \sum_{q=1}^{m+1} \tau_{(m+1),q} \left[\frac{\partial \overset{(m-q+1)}{D_i}}{\partial \theta_j^a} \overset{(q-1)}{e_i} + \overset{(m-q+1)}{D_i} \frac{\partial \overset{(q-1)}{e_i}}{\partial \theta_j^a} - \frac{\partial \overset{(m-q+1)}{C_i}}{\partial \theta_j^a} \overset{(q-1)}{f_i} - \overset{(m-q+1)}{C_i} \frac{\partial \overset{(q-1)}{f_i}}{\partial \theta_j^a} \right] \quad (5.3.6.17)$$

$$\frac{\partial \overset{(m)}{D_i}}{\partial \theta_j^a} = \sum_{q=1}^{m} \tau_{mq} \left[\frac{\partial \overset{(m-q+1)}{\theta_i}}{\partial \theta_j^a} \overset{(q-1)}{C_i} + \overset{(m-q+1)}{\theta_i} \frac{\partial \overset{(q-1)}{C_i}}{\partial \theta_j^a} \right] \quad (5.3.6.18)$$

$$\frac{\partial \overset{(m)}{C_i}}{\partial \theta_j^a} = - \sum_{q=1}^{m} \tau_{mq} \left[\frac{\partial \overset{(m-q+1)}{\theta_i}}{\partial \theta_j^a} \overset{(q-1)}{D_i} + \overset{(m-q+1)}{\theta_i} \frac{\partial \overset{(q-1)}{D_i}}{\partial \theta_j^a} \right] \quad (5.3.6.19)$$

$$\frac{\partial \overset{(m)}{e_i}}{\partial \theta_j^a} = \sum_{k \in N} \left[R_{ij} \frac{\partial \overset{(m)}{D_k}}{\partial \theta_j^a} + X_{ij} \frac{\partial \overset{(m)}{C_k}}{\partial \theta_j^a} \right] \quad (5.3.6.20)$$

$$\frac{\partial \overset{(m)}{f_i}}{\partial \theta_j^a} = \sum_{k \in N} \left[- R_{ij} \frac{\partial \overset{(m)}{C_k}}{\partial \theta_j^a} + X_{ij} \frac{\partial \overset{(m)}{D_k}}{\partial \theta_j^a} \right] \quad (5.3.6.21)$$

5.3.7. Sensibilidade da Energia Crítica Total Relativa à Posição Angular Pré-Falta

As expressões desenvolvidas anteriormente, são suficientes para o cálculo da sensibilidade da energia total correspondente ao instante de eliminação de defeito. Para a conclusão do cálculo da sensibilidade da margem de segurança (5.3.6), falta somente a sensibilidade da energia crítica total, a qual será tratada adiante.

O cálculo da sensibilidade de energia crítica total pode ser avaliada, basicamente, de duas formas, a saber:

(i) De modo similar à sensibilidade da energia total de eliminação de defeito (Ee), entretanto considerando-se a trajetória sob defeito até o estado correspondente ao tempo de eliminação de defeito e trajetória pós-defeito que começa neste estado. O cálculo da sensibilidade é obtido no ponto (θ^c, ω^c) sobre a trajetória pós-defeito, que corresponde à máxima aproximação à SLEP;

(ii) Supor que o estado (θ^c, ω^c) ocorre na vizinhança de algum ponto de equilíbrio instável. Neste caso, a sensibilidade da energia crítica será:

$$\left.\frac{\partial Ecrit_i}{\partial \theta_j}\right|_{(\theta^c,\ \omega^c)} \cong (\theta_i^c - \theta_i^p)^T \frac{\partial Pm}{\partial \theta_j} \qquad (5.3.7.1)$$

visto que:

$\omega_i^c \cong 0,$

$$\left.\frac{\partial Ep r}{\partial \theta j^{a}}\right|_{(\theta r^{c},\omega r^{c})} \cong 0.$$

A solução alternativa **(i)** representa um custo computacional mais elevado que a alternativa **(ii)**, devido ao número necessário de atualizações da sensibilidade da trajetória ($\partial\theta r/\partial\theta^{a}$, $\partial\omega r/\partial\theta^{a}$), durante e pós-defeito. Por outro lado, a alternativa **(ii)** será precisa caso se confirme a hipótese. Entretanto, ressalta-se que o ponto onde a trajetória pós-defeito, que começa sobre a trajetória de defeito em um ponto $\theta(tcrit+\varepsilon)$ cruza a SLEP, com maior freqüência, em um ponto distante do ponto de equilíbrio instável.

No sentido de se evitar o excessivo tempo de cálculo da solução **(i)** ou a incerteza da solução **(ii)**, buscar-se-á, a seguir, estabelecer uma terceira alternativa, baseada em sensibilidade da energia crítica total, considerando-se somente a trajetória sob defeito, similarmente ao cálculo da sensibilidade da energia no estado correspondente à eliminação do defeito.

A energia total do sistema, considerando-se tempo de eliminação de defeito em tcrit (tempo crítico), manter-se-á constante durante a evolução da trajetória pós-falta definida por

$$E(\theta r(tcrit),\omega r(tcrit))) = E(\theta r^{c},\ \omega r^{c}) \qquad (5.3.7.2)$$

sendo:

$E(\theta r(tcrit),\omega r(tcrit))$ = Estado sobre a trajetória de defeito correspondente ao tempo crítico

$(\theta r^{c},\omega r^{c})$ = Energia crítica total determinada pelo método SLEP.

Calculando-se os gradientes, em ambos lados da equação (5.3.7.2), obtém-se

(1) $\nabla E(\theta r(tcrit), \omega r(tcrit)) \triangleq \frac{\partial E_a}{\partial \theta} \Big|_{(\theta r(tcrit), \omega r(tcrit))}$ (5.3.7.3)

sendo calculado na trajetória sob defeito, utilizando-se o procedimento apresentado anteriormente para a obtenção da sensibilidade da energia total em te;

(2) $\nabla E(\theta r^c, \omega r^c) \triangleq \frac{\partial E_a}{\partial \theta} \Big|_{(\theta r^c, \omega r^c)}$ (5.3.7.4)

calculado conforme solução alternativa **(i)**.

Neste trabalho, utilizar-se-á a relação mostrada abaixo para expressar $\nabla E(\theta r^c, \omega r^c)$, baseada em exaustivas observações com simulações realizadas:

$$\nabla E(\theta r^c, \omega r^c) \cong - \nabla E(\theta r(tcrit), \omega r(tcrit)) \qquad (5.3.7.5)$$

Isto significa que, toda a alteração promovida que represente um aumento em Ecrit, diminuirá a energia total do sistema, quando esta for avaliada no instante tcrit, na mesma proporção.

Esta tentativa representa uma forma conveniente para o cálculo da sensibilidade, pois aproveita-se a mesmo esquema utilizado na determinação do gradiente de Ee. De acordo com resultados já obtidos observou-se que este procedimento tem proporcionado resultados satisfatórios. Entretanto, salienta-se a importância de se investigar com mais cuidado o desempenho das outras alternativas acima apresentadas.

Portanto, o gradiente $\nabla E(\theta r^c, \omega r^c)$, necessário para a conclusão do cálculo da sensibilidade da margem de segurança pode ser estimado, com boa precisão, através de $[-\nabla E(\theta r(tcrit), \omega(tcrit))]$, sendo, este, facilmente determinado através do uso de séries de potência conforme proposto previamente. Cabe ressaltar que este procedimento não apresenta um custo computacional adicional, pois ao se calcular a sensibilidade da energia total em te (te > tcrit, representando margem de segurança negativa, a qual deseja-se corrigir), por sucessivas aproximações, a sensibilidade da energia crítica é, também, determinada, bastando apenas armazenar a sensibilidade correspondente ao tempo crítico.

Através do método SLEP, determinou-se, anteriormente, a margem de segurança, o tempo crítico e energia crítica. Este procedimento, leva em conta o comportamento do sistema pós-defeito, portanto, a sensibilidade da energia crítica (5.3.7.5) implicitamente está associada ao comportamento do sistema pós-falta. Esta sensibilidade será usada no sentido de se modificar o ponto de operação antes do defeito, para que o tempo crítico seja maior, ou que, de modo equivalente, a margem de sensibilidade dinâmica seja maior.

5.3.8. Expressão Final da Sensibilidade da Margem de Segurança

Reunindo-se os resultados obtidos anteriormente, chega-se à seguinte expressão para a j-ésima componente do vetor sensibilidade de primeira ordem da margem de segurança:

$$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta j}^{a} = \Bigg\{ \, IDr \; \omega r(tcrit)^{T} \; MD \; \frac{\partial \omega}{\partial \theta j}^{a} \Bigg|_{(\theta r(tcrit),\, \omega r(tcrit))} +$$

$$+ \; [(IDr - 1) \; \theta r^{P} - IDr \; \theta r(tcrit)$$

$$+ \; \theta r(te)]^{T} \; \frac{\partial Pm}{\partial \theta j}^{a} + [Pe(tcrit) - Pm]^{T} \; \frac{\partial \theta r}{\partial \theta j}^{a} \Bigg|_{(\theta r(tcrit),\, \omega r(tcrit))}$$

$$- \; \omega r(te)^{T} \; DM \; \frac{\partial \theta r}{\partial \theta j}^{a} \Bigg|_{(\theta r(te),\, \omega r(te))}$$

$$- \; [Pe(te) - Pm]^{T} \; \frac{\partial \theta r}{\partial \theta j}^{a} \Bigg|_{(\theta r(te),\, \omega r(te))} \Bigg\} \; / \; Ecritr \qquad (5.3.8.1)$$

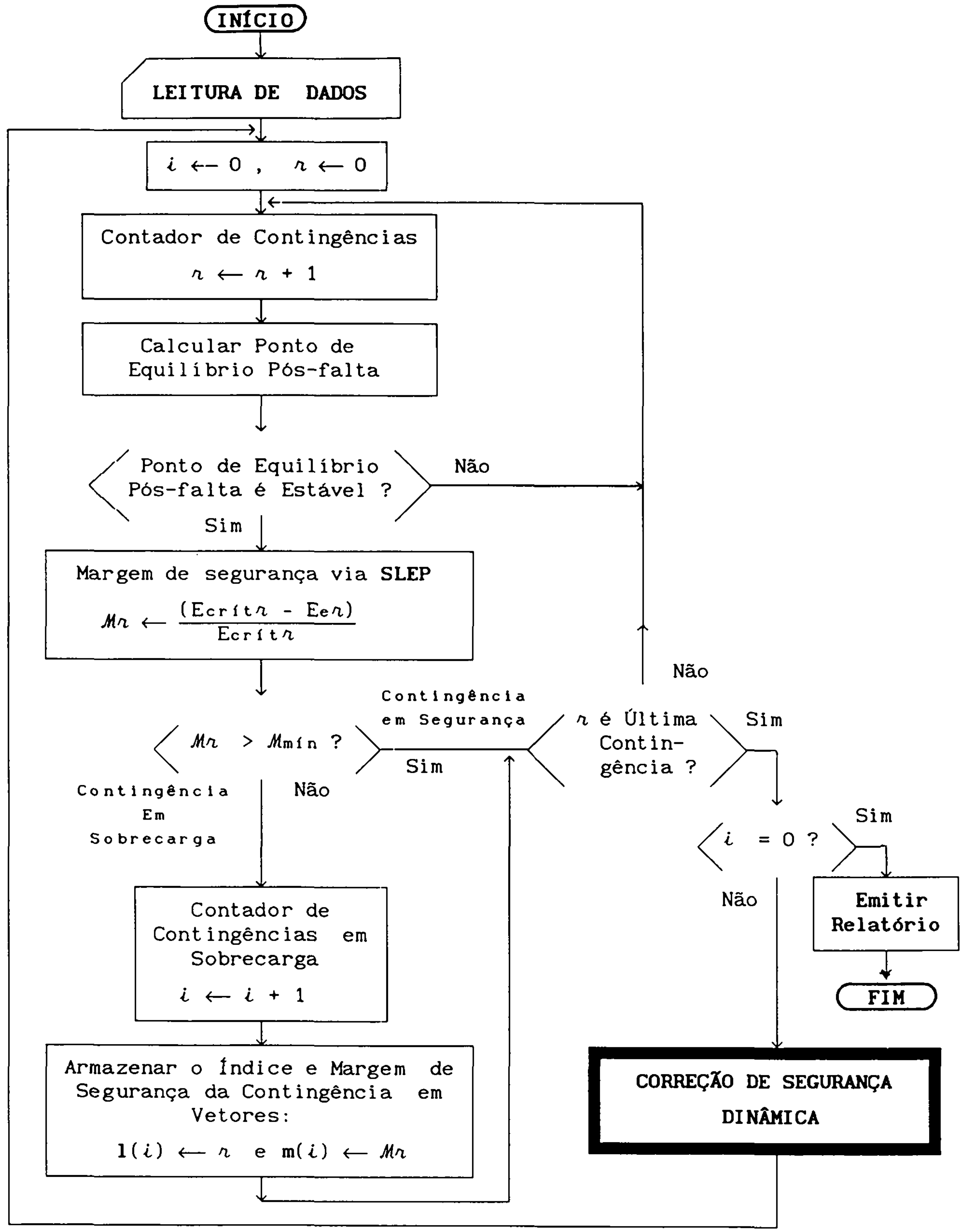
$$j \in N$$

onde:

$$MD \triangleq Diag(M_{s}, \; s \in N) \; .$$

5.4. Algoritmo Conceitual da Solução do Problema do Controle de Segurança Dinâmica

Considerando-se os resultados apresentados acima pode-se descrever o problema da análise de estabilidade transitória, baseada no uso do método SLEP e do controle de segurança dinâmica via análise de sensibilidade, observando-se o algoritmo computacional mostrado na figura 1.



Reavaliação do Resultado Obtido

FIGURA 1. - Algoritmo conceitual para análise e controle de segurança Dinâmica.

5.5. Conclusão

Neste capítulo, discutiu-se o problema da correção de segurança dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica, utilizando-se o método SLEP, margens de segurança e análise de sensibilidade, cuja aplicação será tratada adiante.

A análise de sensibilidade foi empregada com o propósito de se desenvolver uma relação matemática, entre a margem de segurança e o vetor de posições angulares pré-falta. Com isto obtêm-se indicações de modificações nos ângulos que afetam mais a margem de segurança do sistema.

O cálculo da sensibilidade da margem de segurança envolveu a obtenção de várias expressões e teve como aspecto novo e relevante a consideração dos ângulos e velocidades angulares das máquinas síncronas associados à trajetória do sistema sob defeito obtidas usando-se expansões em séries de Taylor. Tais sensibilidades são calculadas através de um algoritmo sistemático, cuja precisão poderá ser ajustada em função da freqüência de reavaliação dos coeficientes e da ordem de aproximação das séries Taylor.

Assim, a partir das expressões apresentadas, pode-se calcular para cada contingência r um vetor de sensibilidades ($\nabla \mathcal{M}r$) usando-se (5.3.8.1). Dado, então, um conjunto de contingências R pode-se obter uma matriz de sensibilidades (n x R), onde n é o número de máquinas do sistema.

A cada coluna desta matriz está associada uma margem de segurança $\mathcal{M}r$. É possível, então, ordenar-se as colunas seguindo a ordem crescente de $\mathcal{M}r$.

O uso destes resultados será indicado no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 6

USO DE SENSIBILIDADE PARA O CONTROLE DE SEGURANÇA DINÂMICA

6.1. Introdução

A relação (5.3.2), gerada através da margem de segurança, método SLEP e análise de sensibilidade, fornece um indicador de onde devem ser alteradas as posições angulares das máquinas síncronas de modo a melhorar a segurança do sistema medida pela menor margem de segurança. Esta considera então o comportamento transitório do sistema, para faltas tipo curto-circuito.

Neste capítulo será proposto um método que utiliza redespacho de geração visando o controle da segurança dinâmica. Outras alternativas poderão ser empregadas. Entretanto, não serão abordadas neste trabalho.

6.2. Redespacho de Geração

A partir da equação (5.3.2), pode-se determinar uma outra, escrita em função de acréscimos no vetor de injeção de potência nodal.

Para pequenas variações angulares usa-se uma relação linear entre a variação da potência mecânica e a variação da posição angular pré-falta é dada por

$$\Delta Pm = H^a \, \Delta\theta^a \tag{6.2.1}$$

onde:

H^a = Matriz Jacobiana do segundo membro de (2.2.8) (equação de equilíbrio) com relação a θ^a, cujos elementos (i,j) podem ser determinados através da equação (5.3.5.8).

Note-se que a matriz H^a é singular, pois os elementos de cada linha desta matriz são linearmente dependentes; como conseqüência, não será possível expressar-se $\Delta\theta^a$ em função de ΔPm . Para resolver este problema, adota-se uma das posições angulares como referência.

As componentes do vetor posição angular pré-falta, referido ao centro de ângulos, são linearmente dependentes, ou seja

$$\sum_{i \in N} Mi \, \theta i^a = 0 \tag{6.2.2}$$

Substituindo-se (θi^a) na equação (6.2.2) por $(\theta i^a + \Delta\theta i^a)$, isto é, promovendo uma pequena mudança do ponto de equilíbrio pré-falta, deduz-se que

$$\sum_{i \in N} Mi \, \Delta\theta i^a = 0 \tag{6.2.3}$$

Isolando-se a k-ésima componente de $\Delta\theta^a$ (adotada como referência) na equação (6.2.3), obtém-se

$$\Delta\theta k^a = -\mathbf{M}i\text{-}k^T \; \Delta\theta i\text{-}k^a \qquad (6.2.4)$$

onde:

$$\mathbf{M}i\text{-}k = \left[\frac{M_1}{M_k} \; \frac{M_2}{M_k} \; \cdots \; \frac{M_{k-1}}{M_k} \; \frac{M_{k+1}}{M_k} \; \cdots \; \frac{M_n}{M_k} \right]^T$$

e $\Delta\theta i\text{-}k^a = [\Delta\theta_1{}^a \;\; \Delta\theta_2{}^a \quad \Delta\theta_{k-1}{}^a \quad \Delta\theta_{k+1}{}^a \quad \Delta\theta_n{}^a \;]^T$

Então, a equação (6.2.1) pode ser reescrita por:

$$\Delta Pm = \mathbf{H}i\text{-}k^a \; \Delta\theta i\text{-}k^a + \mathbf{H}k^a \; \Delta\theta k^a \qquad (6.2.5)$$

onde:

$\mathbf{H}i\text{-}k^a \triangleq$ Matriz $\mathbf{H}^a$ retirando-se a k-ésima linha e k-ésima coluna

e $\mathbf{H}k^a$ = k-ésima coluna de $\mathbf{H}^a$.

Portanto, substituindo-se (6.2.4) em (6.2.5), encontra-se

$$\Delta Pm = \mathbf{H}_{EQ}{}^a \; \Delta\theta i\text{-}k^a \qquad (6.2.6)$$

onde:

$$\mathbf{H}_{EQ}{}^a \triangleq \mathbf{H}i\text{-}k^a - \mathbf{H}k^a \; \mathbf{M}i\text{-}k^T$$

Da equação (6.2.6), obtém-se

$$\Delta\theta_{i-k}^{a} = [H_{EQ}^{a}]^{-1}\ \Delta Pm \tag{6.2.7}$$

que, substituída em (5.3.2) resulta em

$$\Delta \mathcal{M}r = < \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}}\ ,\ [H_{EQ}^{a}]^{-1}\ \Delta Pm > + \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta k^{a}}\ \Delta\theta k^{a} \tag{6.2.8}$$

Substituindo-se $\Delta\theta k^{a}$ através da equação (6.2.4) em (2.2.8), obtém-se

$$\Delta \mathcal{M}r = < \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta^{a}}\ ,\ [H_{EQ}^{a}]^{-1}\ \Delta Pm > - \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta k^{a}} < M_{i-k}\ ,\ \Delta\theta_{i-k}^{a} > \tag{6.2.9}$$

onde:

$$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta_{i-k}^{a}} = \left[\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta_1^{a}}\ \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta_2^{a}} \cdots \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta_{k-1}^{a}}\ \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta_{k+1}^{a}} \cdots \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta_n^{a}}\right]^{T} .$$

E finalmente, substituindo $\Delta\theta_{i-k}^{a}$ por (6.2.7) em (6.2.9), resulta em

$$\Delta \mathcal{M}r = < \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial Pm}\ ,\ \Delta Pm > \geq \mathcal{M}_{min} - \mathcal{M}r^{0} \tag{6.2.10}$$

onde:

$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial Pm} \triangleq$ Vetor de sensibilidade da margem de segurança da r-ésima contingência em relação à potência mecânica com a k-ésima máquina tomada como referência. Assim

$$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial Pm} = [(H_{EQ}{}^{a})^{-1}]^{T} \left(\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta_{i-k}{}^{a}} - \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial \theta_{k}{}^{a}} \mathbb{M}_{i-k} \right)$$

onde:

$$\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial Pm} = \left[\frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial Pm_1} \quad \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial Pm_2} \quad \cdots \quad \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial Pm_n} \right]^{T} .$$

A partir da equação (6.2.10) pode-se determinar acréscimo do vetor de potência mecânica das máquinas síncronas, necessário para se corrigir a margem de segurança para um valor igual ou superior ao mínimo permissível ($\mathcal{M}_{min}$).

Para se gerar esta equação é necessário calcular $\partial \mathcal{M}r/\partial \theta^{a}$ e, também, a matriz $(H_{EQ})^{-1}$, sendo esta responsável pela maior parcela do tempo computacional. Havendo mais de uma contingência em sobrecarga, o custo computacional adicional, basicamente, corresponde ao cálculo de $\partial \mathcal{M}/\partial \theta^{a}$. Isto porque a matriz $H_{EQ}{}^{a}$ é avaliada considerando o estado de equilíbrio e topologia pré-falta, sendo, portanto independente da condição de defeito.

6.2.1. Redespacho de Geração via Otimização

A repartição da carga total do sistema à cada máquina é, normalmente, determinada através de despacho econômico, onde o perfil de geração é definido em função dos custos associados. Este perfil deve ser preservado, a menos que haja comprometimento do nível de segurança do sistema. Deste modo, uma solução pode ser determinada via otimização minimizando por exemplo o desvio do ponto de operação. A solução do problema de otimização deve satisfazer as restrições inerentes do sistema, ou seja, limitação física dos equipamentos, balanço de potência, perfil de tensão nodal, etc.

Conforme mencionado previamente, a solução de controle de segurança dinâmica pode ser resolvida como um problema de controle preventivo, com critérios estáticos, apenas incluindo-se as equações (6.2.10) como restrições.

O controle de segurança dinâmica, via redespacho de geração, será efetuado através da solução do seguinte problema de otimização:

$$\text{Minimizar FO} = f(\Delta Pm) \tag{6.2.1.1}$$

Sujeito a:

1. Restrições de Estabilidade transitória

$$\left\langle \frac{\partial \mathcal{M}_r}{\partial Pm}, \Delta P_m \right\rangle \geq \mathcal{M}_{min} - \mathcal{M}_r^0$$

$$r = 1, 2, \ldots, R.$$

2. Restrição de Balanço de Potência

$$\sum_{i \in N} \Delta Pm_i = 0$$

3. Restrições Referentes à Limitação Física das Máquinas

$$\Delta P_{mín\,i} \leq \Delta Pm_i \leq \Delta P_{máx\,i} \ , \quad i \in N.$$

onde:

$\Delta P_{mín\,i} \triangleq Pm_i^{0} - P_{mín\,i}$

$\Delta P_{máx\,i} \triangleq P_{máx\,i} - Pm_i^{0}$

$P_{mín\,i}$, $P_{máx\,i}$ = Limite mínimo e máximo permissível da potência mecânica, respectivamente

Pm_i^{0} = Potência mecânica referente ao estado inicial de operação da i-ésima máquina

R = Número de contingências que requerem correção de margens de segurança associadas.

4. Restrições de Capacidade da Rede

Neste trabalho o problema de otimização será formulado para se resolver o controle de segurança dinâmica, e não serão incluídas as restrições de capacidade dos equipamentos da rede.

A função objetivo (FO) adotada neste trabalho, é obtida como a soma de n funções do tipo mínimo deslocamento, multi-segmentos (linear por partes), conforme é mostrado na figura 2 (Chan & Hip [11], Stott &Marinho [44], Carvalho *et al.* [10], Opoku [37], Fonseca & Minussi [23])

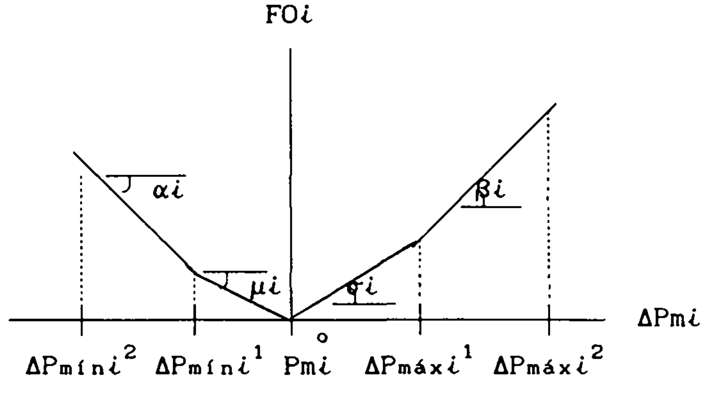


FIGURA 2. Parcela da função objetivo relativa à i - ésima máquina síncrona.

As variáveis referidas na figura 2 são assim definidos:

$$\Delta Pm\acute{a}x_i^{1} \triangleq Pm\acute{a}x_i^{1} - Pm_i^{0}$$

$$\Delta Pm\acute{a}x_i^{2} \triangleq Pm\acute{a}x_i^{2} - Pm\acute{a}x_i^{1}$$

$$\Delta Pm\acute{\imath}n_i^{1} \triangleq Pm_i^{0} - Pm\acute{\imath}n_i^{1}$$

$$\Delta Pm\acute{\imath}n_i^{2} \triangleq Pm\acute{\imath}n_i^{1} - Pm\acute{\imath}n_i^{2}$$

$i \in N$.

As inclinações αi, βi, μi e σi representam os custos incrementais de produção de energia elétrica da i-ésima máquina síncrona.

Desdobrando-se a parcela da função objetivo (Figura 2) em função de quatro outras variáveis, ΔPm_i^1, ΔPm_i^2, ΔPm_i^3, e ΔPm_i^4 (Chan & Hip [11]), relativas aos incrementos positivo e negativo do estado nominal de geração, obtém-se, então, uma soma de quatro funções lineares que reproduzem a função ilustrada na figura 2. Assim,

$$FO = \sum_{i \in N} (\sigma i \, \Delta Pm_i^1 + \beta i \, \Delta Pm_i^2 + \alpha i \, \Delta Pm_i^3 + \mu i \, \Delta Pm_i^4) \qquad (6.2.1.2)$$

onde:

$\Delta Pm\,i^1$ e $\Delta Pm\,i^2$, são acréscimos positivos da potência mecânica

$\Delta Pm\,i^3$ e $\Delta Pm\,i^4$, são acréscimos negativos da potência mecânica.

A variável $\Delta Pm\,i$ é, então, definida por

$$\Delta Pm\,i \triangleq \Delta Pm\,i^1 + \Delta Pm\,i^2 - \Delta Pm\,i^3 - \Delta Pm\,i^4 \qquad (6.2.1.3)$$

Assim, o problema (6.2.1.1), pode ser expresso por:

$$\text{Minimizar FO} = \sum_{i \in N} (\sigma i\ \Delta Pm\,i^1 + \beta i\ \Delta Pm\,i^2 + \alpha i\ \Delta Pm\,i^3 + \mu i\ \Delta Pm\,i^4)$$

Sujeito a: (6.2.1.4)

1. Restrições de Estabilidade Transitória

$$< \frac{\partial \mathcal{M}r}{\partial Pm}\ ,\ (\Delta Pm^1 + \Delta Pm^2 - \Delta Pm^3 - \Delta Pm^4) > \ \geq \mathcal{M}_{min} - \mathcal{M}r^0$$

$$r = 1, 2, \ldots, R. \qquad (6.2.1.5)$$

2. Restrição de Balanço de Potência

$$\sum_{i \in N} (\ \Delta Pm\,i^1 + \Delta Pm\,i^2 - \Delta Pm\,i^3 - \Delta Pm\,i^4\ ) = 0 \qquad (6.2.1.6)$$

3. Restrições Referentes à Limitação Física das Máquinas Síncronas

$0 \leq \Delta Pm\,i^1 \leq \Delta P_{máx}\,i^1$,

$0 \leq \Delta Pm\,i^2 \leq \Delta P_{máx}\,i^2$,

$0 \leq \Delta Pm\,i^3 \leq \Delta P_{mín}\,i^1$,

$$0 \le \Delta Pm_i^4 \le \Delta Pmim_i^2, \qquad (6.2.1.7)$$

$i \in N$

onde:

$$\Delta Pm^k = [\ \Delta Pm_1^k\ \Delta Pm_2^k\ \ldots\ \Delta Pm_n^k\ ]^T,\ k = 1,2,3,4$$

Então, o problema do controle de segurança dinâmica, utilizando-se o redespacho de geração, é resolvido através da minimização da função objetivo (6.2.1.4), sujeita às restrições (6.2.1.5) - (6.2.1.7). A solução deste problema (por programação linear) será dada em função das variáveis ΔPm_i^1, ΔPm_i^2 , ΔPm_i^3 , $\Delta Pm_i^4 \ge 0$, $i \in N$. Para conversão às variáveis originais (ΔPm_i, $i \in N$), deve-se utilizar a equação (6.2.1.3).

6.3. Limitação do Modelo Desenvolvido

O modelo (6.2.10) é linear e tem por objetivo resolver um problema essencialmente não-linear. Logo, deve-se promover alterações dentro de uma faixa de valores que não comprometem a precisão dos resultados. Caso $\Delta \mathcal{M}r$ seja expressivo, a solução do problema pode ser encontrada por processo iterativo. Outra alternativa, consiste no desenvolvimento de um modelo através da análise de sensibilidade de ordem superior. Em princípio, tal procedimento é perfeitamente factível, pois o cálculo da sensibilidade de primeira ordem pode ser facilmente estendido para ordem superior, da mesma forma. Neste caso, porém, haverá um aumento significativo do tempo de cálculo e da memória requerida para processamento. Neste trabalho, adotar-se-á como procedimento de controle de segurança, o uso de sucessivas linearizações (modelo 5.3.2). O critério de determinação do passo para o processo iterativo será baseado no conceito de Esforço de Deslocamento de Margem de Segurança, o qual será apresentado a seguir e representa um procedimento heurístico para se estimar automaticamente o número de linearizações a executar.

6.3.1. Esforço de Deslocamento da Margem de Segurança

Esta sub-seção tem por objetivo definir e sugerir uma estimativa para o valor do esforço de deslocamento da margem de segurança, no processo iterativo, tal que os resultados obtidos tenham precisão considerada satisfatória.

Definição 13. Define-se **Esforço de Deslocamento da Margem de Segurança** como sendo uma função que relaciona a margem de segurança inicial e final (objetivo a ser atingido), da seguinte forma:

$$\mathcal{E} \triangleq \frac{1 - \mathcal{M}^{0}}{1 - \mathcal{M}_{A}} - 1 \qquad (6.3.1.1)$$

onde:

$\mathcal{E}$ = Esforço de Deslocamento da Margem de Segurança (EDMS)

$\mathcal{M}^{0}$ = Margem de Segurança inicial

$\mathcal{M}_{A}$ = Margem de Segurança final a ser obtida (margem de segurança alvo)

A equação (6.3.1.1) dá uma idéia de quanto a relação Ee/Ecrit referente ao objetivo a ser atingido ($\mathcal{M}_{A}$) é menor comparada ao valor desta mesma relação calculada na condição inicial ($\mathcal{M}o$). A unidade subtraída é empregada para ajustar esta equação de tal forma que se tenha $\mathcal{E} = 0$, quando $\mathcal{M}_A = \mathcal{M}^0$ (no caso, nenhum esforço é observado). Note-se que, $\mathcal{E}$ é definido no intervalo $[0,+\infty)$ e tem crescimento significativo à medida que $\mathcal{M}_A$ se aproxima de 1. A figura 3, mostra o comportamento de $\mathcal{E}$ em função de $\mathcal{M}_A$, tomando-se como exemplo margens de segurança iniciais iguais a (-3), (-2) e (-1).

<u>**Critério 1**</u>. Propõe-se como critério de determinação do passo para o processo iterativo, <u>a adoção de $\mathcal{E}$ constante</u>.

De acordo com experiências efetuadas, tem-se como resultado da aplicação do critério 1, a manutenção da precisão, dentro de uma mesma faixa de valores a cada passo do cálculo iterativo.

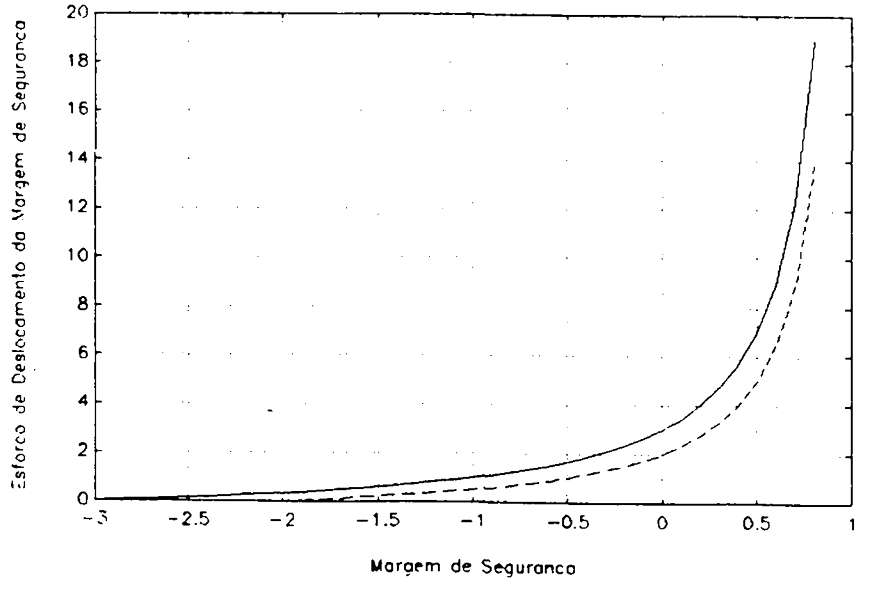


FIGURA 3. Esforço de deslocamento da margem de segurança em função da margem de segurança a ser atingida ($\mathcal{M}_A$), considerando $\mathcal{M}^0$ iguais a (-3), (-2) e (-1).

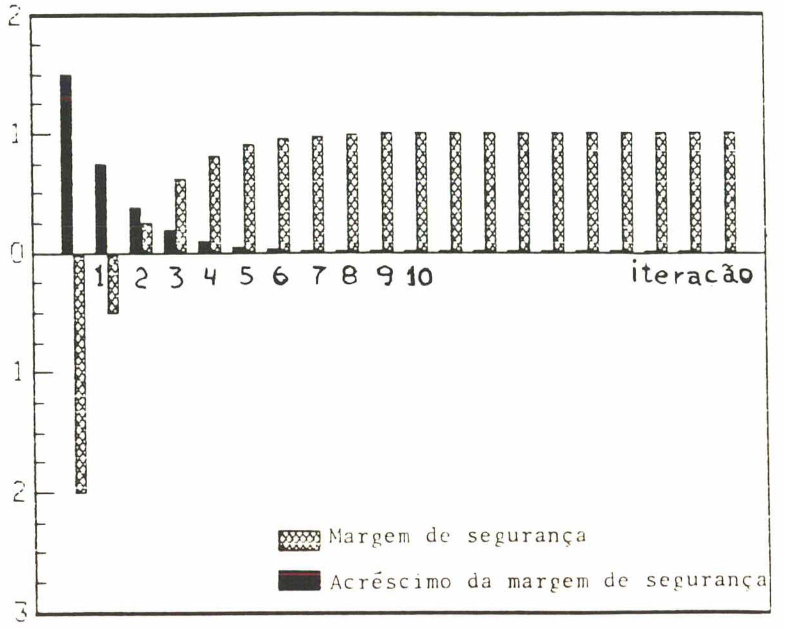


FIGURA 4. Comportamento da margem de segurança alvo em função do número de iterações, adotando-se $\mathcal{E}$ = 1 e ponto de partida $\mathcal{M}^0 = -2$.

A figura 4 mostra o comportamento da margem de segurança alvo ($\mathcal{M}_A$) em função do número de iterações do processo iterativo e acréscimo da margem obtida à cada iteração , levando-se em conta $\mathcal{E}$ igual a 1 e ponto de partida $\mathcal{M}^0 = -2$.

Da Figura 4, observa-se que, considerando-se $\mathcal{E} = 1$ e $\mathcal{M}^0 = -2$, com duas iterações obtém-se $\mathcal{M}_A$ igual 0,25, enquanto que para se atingir $\mathcal{M}_A$ igual a 0,95 são necessários seis iterações. Portanto, o maior ganho na margem de segurança é obtido nas duas primeiras iterações. Nas iterações subseqüentes o ganho torna-se pouco expressivo.

Dos resultados acima, pode-se arbitrar dois parâmetros importantes para a realização do controle de segurança dinâmica: a magnitude de $\mathcal{E}$ e margem de segurança final a ser obtida. O esforço de deslocamento da margem de segurança deve situar-se entre 1 e 1,5. Abaixo de 1, o número de iterações torna-se elevado, elevando consequentemente o custo computacional, enquanto que para valores acima de 1,5, o erro introduzido pode tornar-se significativo. O objetivo do controle de segurança está em encontrar uma nova margem de segurança positiva. Entretanto, à medida que $\mathcal{M}_A$ cresce, crescerá também o número de iterações, e a ação de controle será mais dispendiosa. Deste modo, parece conveniente adotar-se $\mathcal{M}_{min}$ em torno de 0,3. Este número representa uma condição suficiente de estabilidade transitória com um número reduzido de iterações.

<u>Critério 2</u>. Propõe-se a adoção do esforço de deslocamento da margem de segurança (passo para o cálculo iterativo) constante, com valor compreendido entre 1 e 1,5 e margem de segurança mínima permissível ($\mathcal{M}_{min}$) igual a 0,3.

Deve-se ressaltar que a adoção $\mathcal{M}_{min}$ igual a 0,3, embora caracterize a estabilide do sistema, não oferece condições para se saber se a "distância" entre o tempo de eliminação de defeito e o tempo crítico (margem de tempo). Assim, o objetivo poderá ser atingido ($\mathcal{M} \geq \mathcal{M}_{min}$), entretanto, a margem de tempo poderá ser muito pequena o que representará efetivamente pouca segurança do sistema. Deste ponto de vista, em novas investigações procurar-se-á incluir também o efeito relativo à margem de tempo.

6.4. Determinação do Número de Contingências a Serem Monitoradas

Note-se que o esforço de deslocamento da margem de segurança, correspondente ao esforço necessário ao deslocamento da margem de $\mathcal{M}^0$ para $\mathcal{M}_A$ é idêntico ao esforço necessário para mover a margem de segurança de $\mathcal{M}_A$ para $\mathcal{M}^0$, efetuando-se a troca de $\mathcal{M}^0$ por $\mathcal{M}_A$ e vice versa. Assim, a seguir, buscar-se-á definir um critério, baseado no conceito de EDMS, para seleção de contingências para as quais devem-se gerar as sensibilidades das margens de segurança correspondentes, e, conseqüentemente, na determinação do número de restrições de estabilidade transitória a serem incluídas no problema de programação linear para o caso do redespacho de geração.

Adotando-se um valor para o EDMS de acordo com o critério 2, pode-se determinar a margem de segurança alvo ($\mathcal{M}_A$) através da equação (6.3.1.1). Designa-se o EDMS arbitrado por $\mathcal{E}_{máx}$. Utiliza-se como critério para determinação de um conjunto de contingências a serem monitoradas, tomando-se como limite superior, a margem de segurança definida por

$$\mathcal{M}_M = 1 - \frac{1 - \mathcal{M}_A}{1 + \mathcal{E}_{máx}} \qquad (6.3.1.2)$$

onde:

$\mathcal{M}_M$ = Margem de segurança limite superior.

A equação (6.3.1.2) é obtida de (6.3.1.1), supondo-se que uma contingência com margem de segurança igual a $\mathcal{M}_M$, mesmo sofrendo um decréscimo definido pelo esforço $\mathcal{E}_{máx}$, atingirá após redespacho de geração um valor não inferior a $\mathcal{M}_A$. Assim, as contingências com margens superiores a $\mathcal{M}_M$, não necessitam ser monitoradas (os EDMS's necessários para mover suas margens até $\mathcal{M}_A$ são maiores que $\mathcal{E}_{máx}$). Assim, ao se efetuar o redespacho, espera-se que todas as contingências ficarão com suas margens igual ou superior a $\mathcal{M}_A$, embora não sejam monitoradas todas as contingências da lista.

<u>Exemplo</u>. Considera-se como exemplo o caso de dez máquinas estudado na sub-seção 7.2, cujos resultados da análise se encontram na tabela 1. Observa-se que a margem de segurança do sistema é $\mathbb{M}$ = - 1,73. Assim, arbitrando-se $\mathcal{E}$ = 0,95, obtém-se $\mathcal{M}_A$ = -0,4. Utilizando-se a equação (6.3.1.2) e os valores de $\mathcal{E}$ e $\mathcal{M}_A$, obtém-se $\mathcal{M}_M$ = 0,2820. Portanto, com o valor de $\mathcal{M}_M$, define-se o conjunto de contingências a serem monitoradas como sendo formado pelas contingências 11, 12 13 e 8. Com isto, reduz-se o número de contingências sob observação de 16 para apenas 4 contingências.

Este procedimento visa reduzir o número de equações de sensibilidade (6.2.9), consequentemente, reduzindo o número de restrições do problema (6.2.1.5), sem afetar a qualidade dos resultados obtidos.

6.5. <u>Conclusão</u>

Neste capítulo, foi proposto um algoritmo para o controle de segurança dinâmica, utilizando-se ações de controle tipo redespacho de geração. Este algoritmo, foi desenvolvido a partir do cálculo da sensibilidade da margem de segurança, possibilitando, assim, localizar e definir as mudanças na geração através de programação linear, visando minimizar o desvio em torno do estado nominal de geração.

Outras alternativas de controle, *e.g.*, o uso de transformadores defasadores, redefinição do perfil de tensão nodal (laço reativo), corte de carga, mudança da topologia da rede, etc, poderão ser desenvolvidas, visto que o método proposto está baseado na sensibilidade da margem de segurança com relação ao vetor posição angular pré-falta e, a partir desta, todas as alternativas são derivadas, utilizando-se transformações apropriadas.

Finalmente foi discutida a limitação do modelo desenvolvido e proposto um procedimento baseado em linearizações sucessivas. Através da proposição e uso do conceito de esforço de deslocamento de margem de segurança, pôde-se definir o tamanho do passo para o processo iterativo, de forma que as soluções apresentadas sejam de boa qualidade. Pode-se ainda, usando o conceito de esforço de deslocamento, reduzir o número de contingências monitoradas na determinação da solução do problema do controle de segurança o que consequentemente, torna o cálculo mais competitivo do ponto de vista da rapidez e precisão das soluções.

CAPÍTULO 7

APLICAÇÕES

7.1. Introdução

Este capítulo destina-se à apresentação de testes computacionais considerando-se um sistema baseado na configuração da região Sul do Brasil composto por 10 máquinas e o sistema IEEE 118 barras com 20 máquinas síncronas, utilizando-se o método SLEP, análise de sensibilidade e redespacho de geração.

7.2. Sistema de 10 Máquinas

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos utilizando-se o método SLEP e a metodologia proposta. Os dados do sistema estão gravados em unidades de discos no IBM-3090 da UFSC. O diagrama unifilar e dados deste sistema encontram-se no Apêndice B. Neste estudo consideram-se faltas tipo curto-circuito com tempo de eliminação de defeito igual a 15s (9 ciclos) seguido da perda da linha ou transformador sob falta. Os valores em por unidade referem-se a uma base de 100 MVA.

A Tabela 1 mostra os resultados do estudo de estabilidade transitória para 16 contingências dispostas em ordem crescente dos valores das margens de segurança. Nas colunas 1 a 6 constam, respectivamente, a numeração das contingências segundo uma lista definida previamente, barra de ocorrência do curto-circuito, barras terminais do circuito retirado, tempo crítico e margem de segurança. A contingência que se encontra no topo da lista ordenada é a mais crítica e as subseqüentes são menos críticas pela ordem.

Todas as tabelas de resultados dos estudos de estabilidade transitória, apresentadas neste capítulo, seguem este mesmo padrão.

Note-se que, na Tabela 1, existem 3 contingências instáveis: as contingências 11, 12 e 13. A margem de segurança do sistema é $M = -1,73$. Deste modo faz-se necessário proceder à correção de segurança do sistema. Para tanto utilizam-se os parâmetros abaixo, de acordo com os critérios apresentados antes:

(1) Desenvolvimento do Modelo de Sensibilidade

- Margem de segurança mínima ($\mathcal{M}_{mím}$) = 0,3
- Número de Termos das séries = 6
- Tempo de atualização dos coeficientes das séries = 0,10s

(2) Redespacho de Geração

- Percentual máximo de potência a ser realocado em cada máquina igual a 15%.

Este percentual não corresponde à limitação física das máquinas, apenas é utilizado para se evitar elevados valores realocados em cada máquina. Entretanto, não se deve reduzir muito este percentual, pois poderá comprometer a solução do problema de otimização (ocorrência de soluções inviáveis).

(3) Coeficientes da Função Objetivo

- $\alpha i,\ \beta i = 1,2 \qquad i \in N$
- $\mu i,\ \sigma i = 1,0 \qquad i \in N.$

O esforço de deslocamento da margem de segurança, considerando-se as margens de segurança inicial $\mathcal{M}^0 = -1,73$ e final $\mathcal{M}_A = \mathcal{M}_{mím} = 0,3$ é

$$\mathcal{E} = 2,90$$

Neste caso, $\mathcal{E}$ excede o valor adotado no critério 2. Por conseguinte, o controle de segurança dinâmica deverá ser resolvido por processo iterativo, de acordo com os seguintes passos:

Passo 1. De acordo com o critério 2, adota-se $\mathcal{E} = 0,95$ e portanto $\mathcal{M}_A = -0,4$.

Passo 2. Margem de segurança a ser atingida: $\mathcal{M}_A = \mathcal{M}_{mín} = 0,3$, correspondendo a $\mathcal{E} = 1,0$.

TABELA 1. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Caso base - 10 máquinas.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade

N.º Da Contin-gência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado					Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segu-rança
		Barra Origem		Barra Destino		Cir-cuito		
		N.º	Nome	N.º	Nome			
1	2	3				4	5	6
11	374	374	S.Osório	375	Areia	1	6,0	-1,730
12	374	374	S.Osório	371	Xanxerê	1	7,8	-0,600
13	374	374	S.Osório	433	C.Mourão	1	8,4	-0,365
8	408	408	Itaúba	414	V.Aires	1	10,2	0,220
16	391	391	S.Santiago	398	Segredo	1	16,8	0,779
5	382	382	Areia	398	Segredo	1	24,0	0,786
10	370	370	P.Fundo	368	Farroup.	1	19,8	0,841
1	382	382	Areia	386	Barracão	1	26,4	0,871
15	391	391	S.Santiago	343	Ivaiporã	1	21,0	0,874
14	391	391	S.Santiago	389	Pinheiro	1	22,2	0,881
2	382	382	Areia	343	Ivaiporã	1	24,6	0,916
6	386	386	Barracão	387	Gravataí	1	25,8	0,924
3	382	382	Areia	383	Curitiba	1	26,4	0,936
4	382	382	Areia	484	Cur.Norte	1	27,0	0,938
9	414	414	V.Aires	408	Itaúba	1	NFE	NFE
7	388	388	V.Aires	389	Pinheiro	1	NFE	NFE

Tempo de Eliminação de Defeito = 9 ciclos

Obs: NFE significa que não foi possível encontrar a SLEP com falta mantida, considerando-se o tempo de simulação pré-especificado. Neste caso a referida contingência possui tempo crítico elevado.

7.2.1. Definição das Contingências que Comporão o Conjunto de Restrições Para o Problema do Redespacho de Geração

Utilizando-se o conceito de esforço de deslocamento de margem de segurança, pode-se definir, de acordo com o ítem 6.3.2, o conjunto de contingências a serem monitoradas, como sendo composto pelas quatro primeiras da lista apresentada na tabela 1 (contingências 11, 12, 13 e 8). A margem de segurança limite máxima ($\mathcal{M}_M$) a ser observada é igual a 0,2820, neste caso.

Na Tabela 2, apresenta-se o redespacho de geração referente ao primeiro passo do processo iterativo e o vetor de sensibilidade da margem de segurança para as contingências monitoradas.

TABELA 2. - Vetor sensibilidade da margem de segurança e redespacho de geração - Passo 1.

Número Barra	Sensibilidade da Margem de Segurança ($\partial Mn/Pm$)				Redespacho de Geração (pu)
	Contingência				
	11	12	13	8	
366	0,0574	0,0407	0,0382	0,0260	0,0000
369	-0,1154	-0,0975	-0,0183	-0,0076	0,0000
373	-1,2012	-0,7371	-0,6086	0,0191	-0,9860
381	0,0936	0,0656	0,0547	0,0316	0,0000
390	0,1248	0,0860	0,0707	0,0391	0,9860
392	-0,0869	-0,0589	-0,0394	-0,0104	0,0000
394	-0,0932	-0,0619	-0,0409	-0,0103	0,0000
395	-0,0947	-0,0635	-0,0418	-0,0101	0,0000
397	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
407	-0,1221	-0,0841	-0,0381	-0,5718	0,0000

Observação: A componente do vetor $\partial M/\partial Pm$ referente à máquina número 397 é atribuída como zero, em vista desta ser adotada como referência.

Os resultados da análise de estabilidade para o redespacho do passo 1, encontram-se relacionados na Tabela 3.

Novamente, aplicando-se o conceito EDMS, o conjunto de contingências a serem monitoradas é composto pelas contingências 11, 8, 12 e 13. O redespacho de geração e sensibilidades destas contingências estão relacionados na Tabela 4.

TABELA 3. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Passo 1.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade								
Nº Da Contin-gência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado					Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segu-rança
		Barra Origem		Barra Destino		Cir-cuito		
		Nº	Nome	Nº	Nome			
11	374	374	S.Osório	375	Areia	1	7,8	-0,368
8	408	408	Itaúba	414	V.Aires	1	10,2	0,125
12	374	374	S.Osório	371	Xanxerê	1	9,6	0,136
13	374	374	S.Osório	433	C.Mourão	1	10,2	0,151
16	391	391	S.Santiago	398	Segredo	1	13,2	0,591
5	382	382	Areia	398	Segredo	1	18,6	0,652
15	391	391	S.Santiago	343	Ivaiporã	1	18,0	0,810
14	391	391	S.Santiago	389	Pinheiro	1	19,2	0,824
10	370	370	P.Fundo	368	Farroup.	1	19,8	0,846
1	382	382	Areia	386	Barracão	1	24,6	0,858
2	382	382	Areia	343	Ivaiporã	1	23,4	0,909
3	382	382	Areia	383	Curitiba	1	24,6	0,923
4	382	382	Areia	384	Cur.Norte	1	25,2	0,924
6	386	386	Barracão	387	Gravataí	1	27,0	0,926
7	388	388	V.Aires	389	Pinheiro	1	NFE	NFE
9	414	414	V.Aires	408	Itaúba	1	NFE	NFE
Tempo de Eliminação de Defeito = 9 ciclos								

Na figura 5 são mostradas a evolução dos ângulos das máquinas síncronas, determinadas através de simulação utilizando-se o programa TRANSDIR (intergração numérica das equações diferenciais que descrevem o

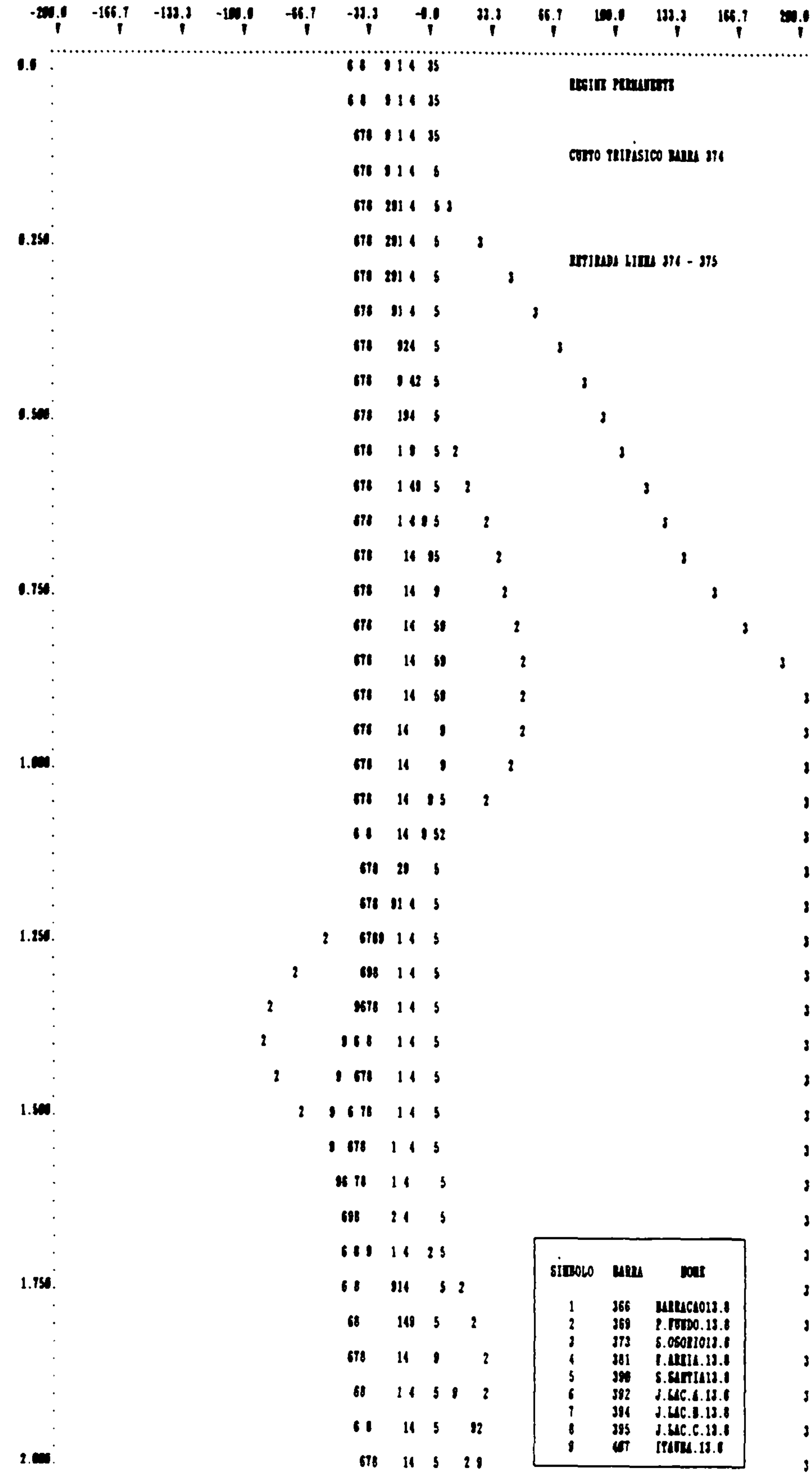


FIGURA 5. - Curvas de oscilação das máquinas síncronas considerando-se a contingência mais crítica (contingência 11) e caso base, obtidas por simulação através do programa TRANSDIR - Caso instável.

movimento do sistema), para a contingência mais crítica segundo o critério da margem de segurança da Tabela 3. Observa-se que a máquina 373 perde o sincronismo e, portanto, o sistema é instável. Este diagnóstico é coincidente com o dado pelo método SLEP.

É importante ressaltar que a simulação é usada, neste trabalho, como um padrão de referência para os estudos de estabilidade transitória.

TABELA 4. - Vetor sensibilidade da margem de segurança e redespacho de geração - Passo 2.

Número Barra	Sensibilidade da Margem de Segurança ($\partial Mr/Pm$)				Redespacho de Geração (pu)
	Contingência				
	11	8	12	13	
366	0,0382	0,0321	0,0279	0,0297	0,0390
369	-0,0142	-0,0009	-0,0406	-0,0023	0,0080
373	-0,5834	0,0239	-0,4138	-0,4222	-0,5890
381	0,0524	0,0383	0,0405	0,0402	0,0520
390	0,0704	0,0484	0,0528	0,0523	0,0710
392	-0,0286	-0,0098	-0,0262	-0,0226	-0,0290
394	-0,0297	-0,0094	-0,0272	-0,0233	-0,0300
395	-0,0303	-0,0091	-0,0277	-0,0236	-0,0300
397	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
407	0,0005	-0,6730	-0,0311	-0,0166	-0,0160

Os resultados finais da análise são mostrados na tabela 5. Observa-se que todas as contingências satisfazem as condições de estabilidade pré-definida, cuja margem do sistema é $M = 0,34$ ($M \geq M_{mín}$).

TABELA 5. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Passo 2.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade								
Nº Da Contingência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado: Barra Origem Nº	Barra Origem Nome	Barra Destino Nº	Barra Destino Nome	Circuito	Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segurança
11	374	374	S.Osório	375	Areia	1	10,8	0,340
8	408	408	Itaúba	414	V.Aires	1	12,0	0,467
12	374	374	S.Osório	371	Xanxerê	1	12,0	0,490
13	374	374	S.Osório	433	C.Mourão	1	12,6	0,550
16	391	391	S.Santiago	398	Segredo	1	13,2	0,591
5	382	382	Areia	398	Segredo	1	20,4	0,747
14	391	391	S.Santiago	389	Pinheiro	1	18,0	0,800
15	391	391	S.Santiago	343	Ivaiporã	1	18,0	0,816
1	382	382	Areia	386	Barracão	1	21,6	0,825
10	370	370	P.Fundo	368	Farroup.	1	19,2	0,850
3	382	382	Areia	383	Curitiba	1	21,0	0,871
4	382	382	Areia	384	Cur.Norte	1	21,0	0,879
2	382	382	Areia	343	Ivaiporã	1	21,6	0,882
6	386	386	Barracão	387	Gravataí	1	22,8	0,891
9	414	414	V.Aires	408	Itaúba	1	NFE	NFE
7	388	388	V.Aires	389	Pinheiro	1	NFE	NFE
Tempo de Eliminação de Defeito = 9 ciclos								

Considerando-se a contingência mais crítica da tabela 5 e redespacho de geração apresentado na tabela 4, os ângulos das máquinas síncronas são mostrados na figura 6. Neste caso, observa-se nitidamente que o sistema é estável. Este diagnóstico é o mesmo dado pelo método SLEP.

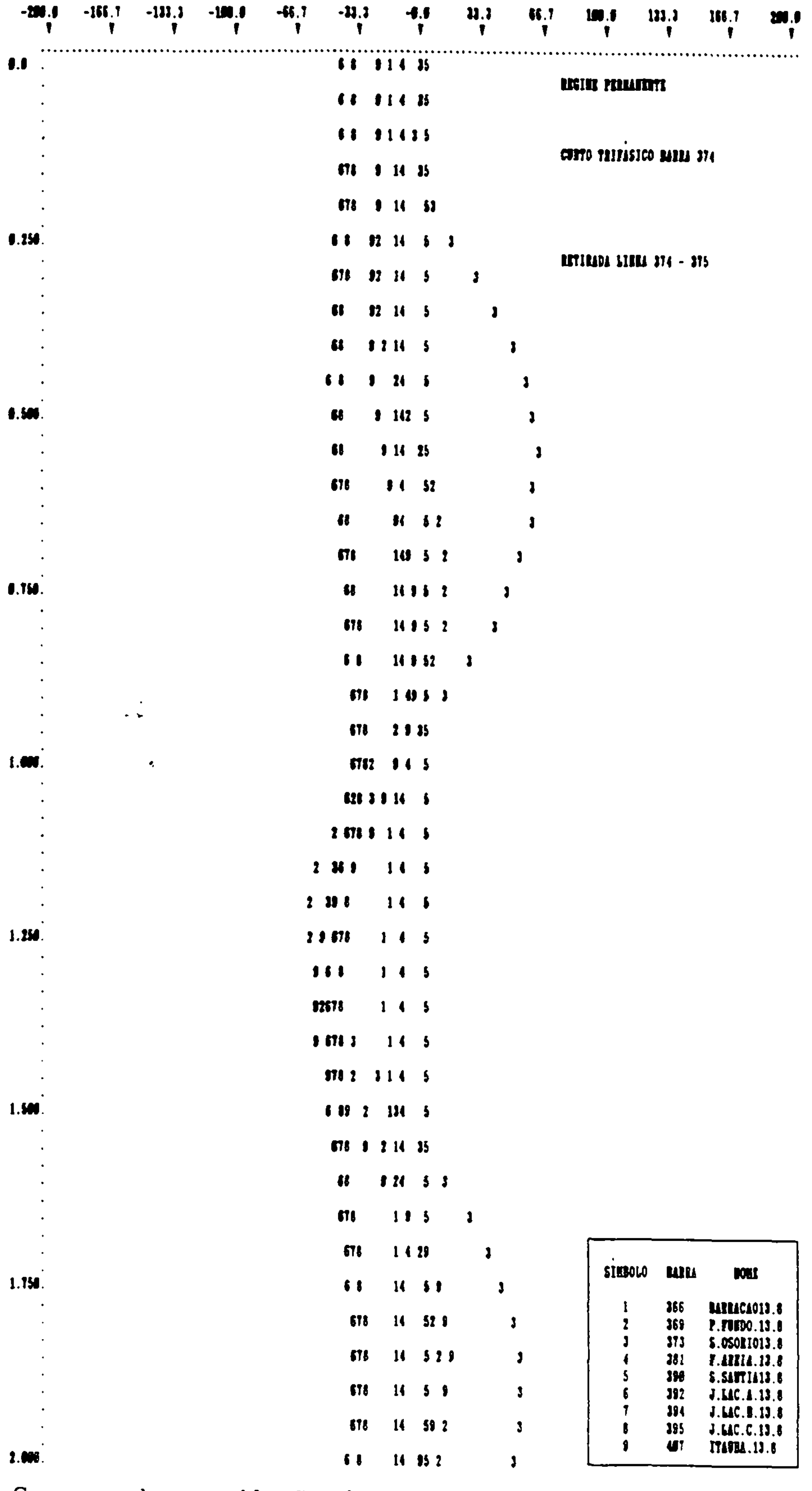


FIGURA 6. - Curvas de oscilação das máquinas síncronas para a contingência mais crítica (contingência 11), após redespacho de geração, obtidas por simulação com o TRANSDIR - Caso estável.

Os resultados ilustra que, utilizando-se o procedimento proposto, é possível obter-se um novo ponto de operação para o sistema de 10 máquinas em análise, de modo que este sistema se torne estável e, além disso, a margem de segurança é igual a especificada inicialmente.

Tendo em conta as não-linearidades do sistema, o resultado foi obtido em 2 passos seguindo-se os critérios estabelecidos. Como confirmação obteve-se um comportamento estável para o sistema após a ocorrência da pior contingência.

7.3. Sistema IEEE 118 Barras - 20 Máquinas Síncronas

Nesta seção, apresentam-se alguns resultados de controle de segurança dinâmica tomando-se como restrições para o redespacho de geração os percentuais da potência nominal de cada máquina de 10 e 15%.

7.3.1 Testes Considerando Percentual Máximo Realocado Por Máquina De 15%

Um teste semelhante ao feito com o sistema de 10 máquinas é apresentado a seguir, considerando o sistema IEEE 118 barras e 20 máquinas síncronas. Os dados deste sistema encontram-se gravados em unidades de discos no IBM-3090 da UFSC e os dados de potências dos geradores estão relacionados na Tabela 7. O diagrama unifilar e dados deste sistema encontram-se no Apêndice C. Os resultados da análise de estabilidade, para 20 contingências, são mostrados na Tabela 6. Consideram-se faltas tipo curto-circuito com tempo de eliminação de defeito igual a 0,15s (09 ciclos), seguido da perda da linha ou transformador sob falta. Cada carga do sistema é tomada como sendo 20% superior ao valor padrão, com o objetivo de tornar mais crítica a operação do sistema.

TABELA 6. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Caso base - Sistema IEEE 118 Barras.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade								
N.º Da Contingência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado					Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segurança
		Barra Origem		Barra Destino		Circuito		
		N.º	Nome	N.º	Nome			
8	4	4		11		1	7,2	-0,860
16	30	30		38		1	8,4	-0,259
9	11	11		12		1	10,2	0,195
12	17	17		113		1	12,0	0,437
11	15	15		17		1	16,2	0,686
19	49	49		50		1	15,6	0,718
1	26	26		25		1	15,6	0,733
20	108	108		109		1	18,6	0,774
7	3	3		5		1	20,4	0,775
6	2	2		12		1	22,8	0,817
2	26	26		30		1	18,6	0,830
5	1	1		2		1	24,6	0,838
18	36	36		35		1	76,8	0,862
10	13	13		15		1	30,0	0,878
3	42	42		40		1	23,4	0,895
4	42	42		41		1	23,4	0,895
13	42	42		49		1	23,4	0,936
15	27	27		115		1	55,2	0,980
14	10	10		9		1	NFE	NFE
17	29	29		31		1	NFE	NFE
Tempo de Eliminação de Defeito = 09 ciclos								

Nas figuras 7.a e 7.b são mostradas as curvas de oscilação das máquinas síncronas, determinadas pelo programa computacional TRANSDIR para a pior contingência. Neste caso, observa-se a perda de sincronismo das máquinas correspondentes às barras 4, 10, 12, 25, 26, 27, 31, 40 e 42. O sistema é, portanto, instável.

Observa-se na tabela 6 a existência de duas contingências instáveis (contingência 8 e 16). A margem do sistema é $\mathbb{M}$ = -0,860. Portanto, há necessidade, como antes, de se corrigir a segurança do sistema. Neste sentido adota-se para o desenvolvimento do modelo de sensibilidade da margem de segurança e redespacho de geração, os mesmos parâmetros utilizados no teste anterior. Para as barras com potência negativa (motor síncrono), adotam-se os coeficientes da função objetivo correspondentes iguais a 10.000 (valor bastante alto), pois estas barras não devem participar da ação de controle.

O EDMS correspondente às margens de segurança inicial $\mathcal{M}^0$ = -0,086 e final $\mathcal{M}_A$ = 0,3, vale:

$$\mathcal{E} = 1,65.$$

Este valor está ligeiramente acima do estabelecido na critério 2. Entretanto, tentar-se-á corrigir a margem do sistema em uma única iteração. Se fosse definido $\mathcal{E}$ = 1,5, chegar-se-ia a uma margem igual a 0,256, portanto, bem próximo de $\mathcal{M}_{mín}$. Neste caso, o segundo passo seria quase que desnecessário.

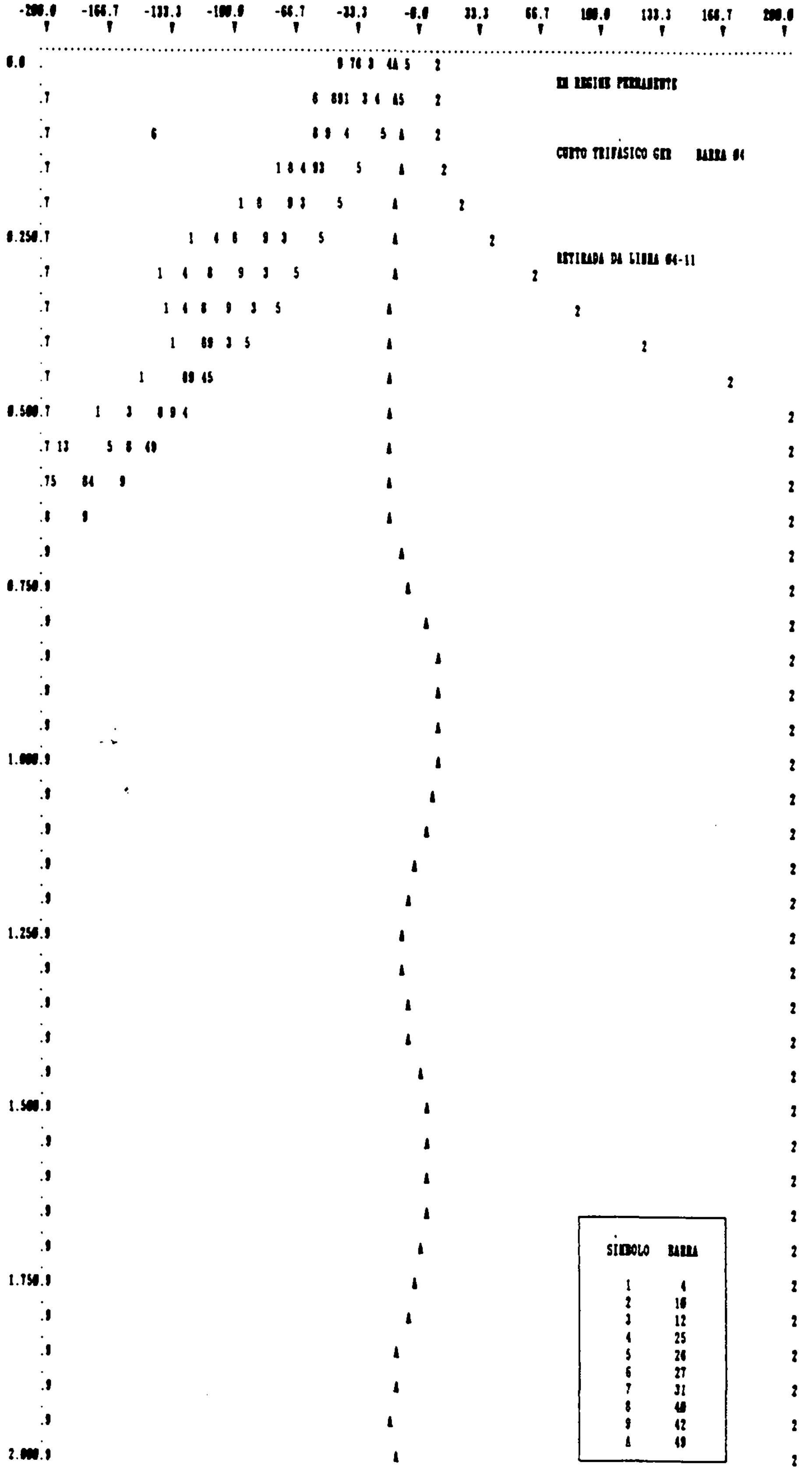


FIGURA 7.a. - Curvas de oscilação das máquinas síncronas considerando-se a contingência mais crítica (contingência 8) e caso base, obtidas por simulação através do programa TRANSDIR - Caso instável.

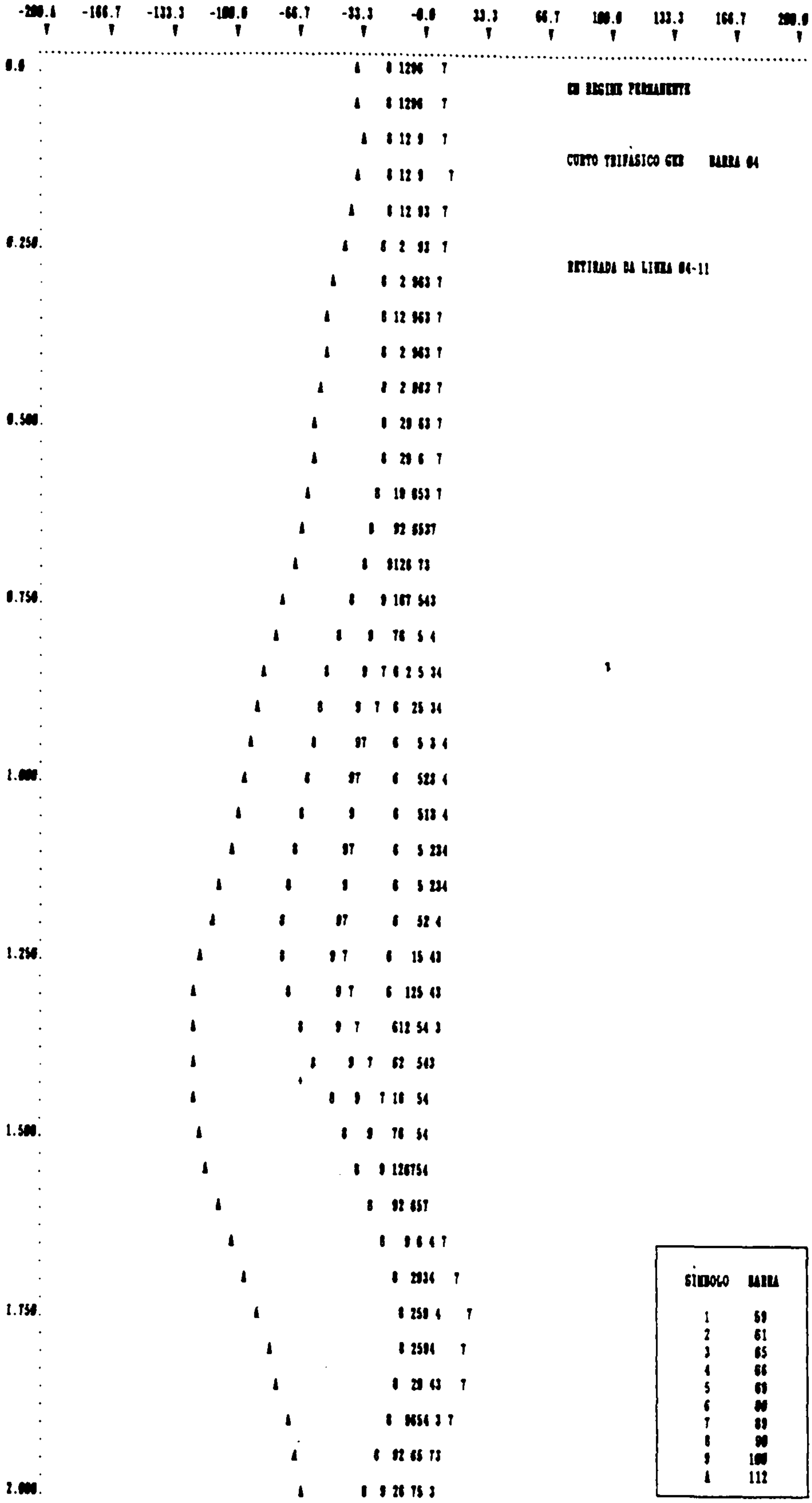


FIGURA 7.b. - Curvas de oscilação das máquinas síncronas considerando-se a contingência mais crítica (contingência 8) e caso base, obtidas por simulação através do TRANSDIR - Caso instável (continuação).

7.3.1.1. <u>**Definição do Conjunto de Contingências a Serem Monitoradas**</u>

Considerando-se os resultados acima e utilizando-se o conceito de EDMS, pode-se definir o conjunto de contingências que devem ser monitoradas como sendo formado pelas contingências 8, 16, 9, 12, 11 e 19, *i.e.*, correspondentes às margens inferiores a $\mathcal{M}_M = 0,73$.

Na Tabela 7 apresenta-se o despacho básico e o redespacho de geração, necessário à correção da segurança do sistema.

Os resultados da análise de estabilidade, após redespacho, estão relacionados na tabela 8.

TABELA 7. – Despacho básico e redespacho de geração.

Número da Barra	Despacho Básico (pu)	Redespacho de Geração (pu)
4	-0,108	0,000
10	7,200	-1,071
12	1,020	0,000
25	0,880	0,000
26	3,760	0,000
27	-0,100	0,000
31	0,084	0,006
40	-0,550	0,000
42	-0,700	0,000
49	2,440	0,000
59	1,860	0,000
61	1,920	0,000
65	4,690	0,000
66	4,700	0,000
69	6,076	0,000
80	5,720	0,000
89	7,280	0,838
90	-1,020	0,000
100	3,020	0,226
112	-0,510	0,000

TABELA 8. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança, após redespacho de geração.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade							
N.º Da Contingência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado				Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segurança
		Barra Origem		Barra Destino		Circuito		
		N.º	Nome	N.º	Nome			
8	4	4		11		1	10,8	0,301
16	30	30		38		1	12,6	0,492
9	11	11		12		1	15,6	0,677
19	49	49		50		1	15,6	0,710
20	108	108		109		1	17,4	0,733
12	17	17		113		1	18,0	0,760
1	26	26		25		1	18,0	0,812
2	26	26		30		1	18,6	0,830
11	15	15		17		1	28,2	0,869
4	42	42		41		1	24,0	0,893
3	42	42		40		1	24,0	0,897
7	3	3		5		1	35,4	0,898
6	2	2		12		1	50,4	0,923
5	1	1		2		1	95,4	0,925
13	42	42		49		1	23,4	0,932
15	27	27		115		1	56,4	0,981
17	29	29		31		1	NFE	NFE
18	36	36		35		1	NFE	NFE
10	13	13		15		1	NFE	NFE
14	10	10		9		1	NFE	NFE
Tempo de Eliminação de Defeito = 09 ciclos								

O conjunto de curvas de oscilação das máquinas, via simulação com o programa TRANSDIR, é mostrado nas Figuras 8.a e 8.b, considerando-se a primeira contingência da lista apresentada na Tabela 8. Observa-se, então, que o sistema agora é estável.

Neste exemplo não se seguiu o critério 2 e, mesmo assim, mostrou que a meta de $\mathbb{M} \geq 0,3$ foi atingida. Isto ilustra uma relativa robustez em relação à escolha do $\mathcal{E}$ que fixa a margem a ser alcançada.

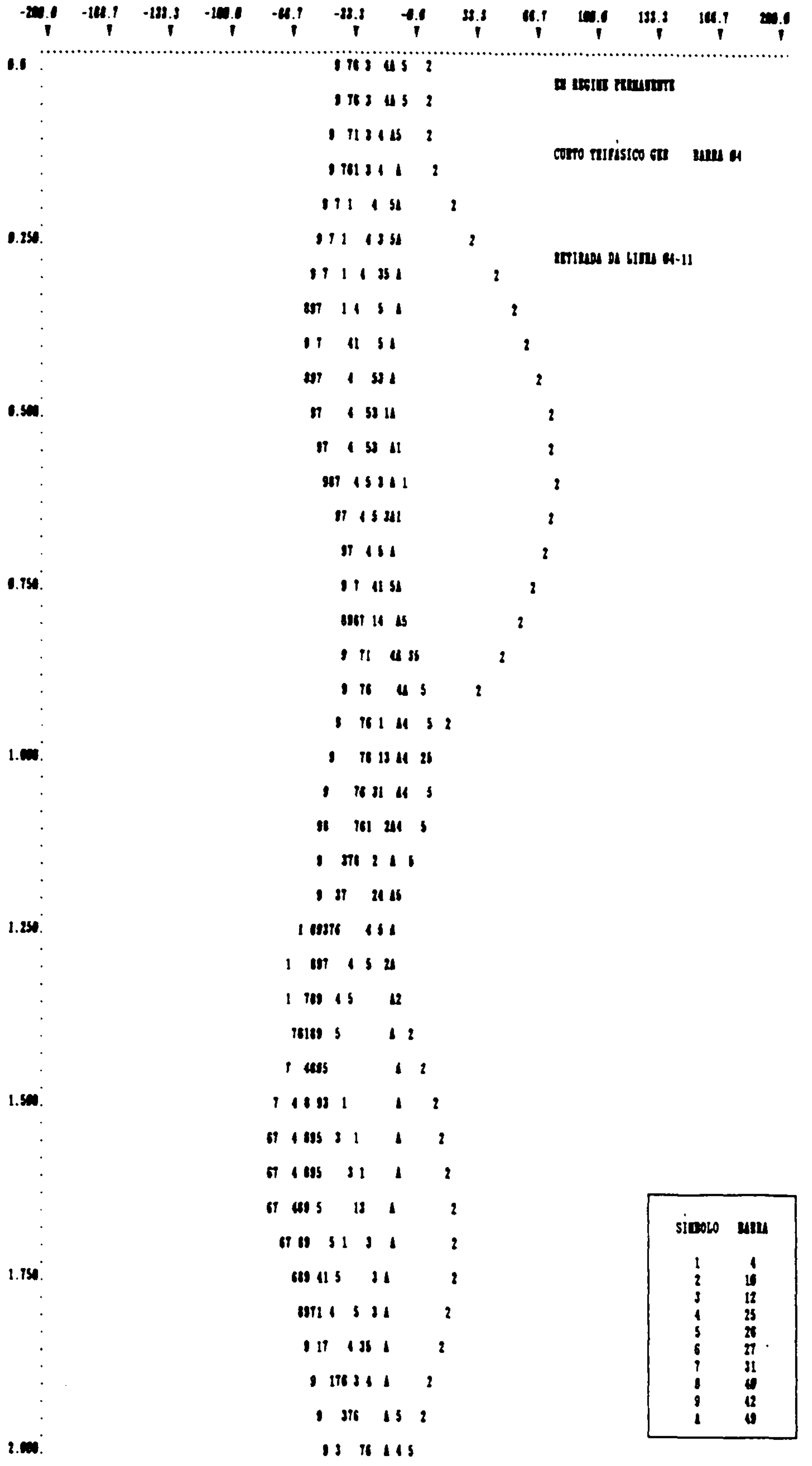


FIGURA 8.a. - Curvas de oscilação das máquinas síncronas para a contingência mais crítica (contingência 8), após redespacho de geração, obtidas por simulação com o TRANSDIR - Caso estável.

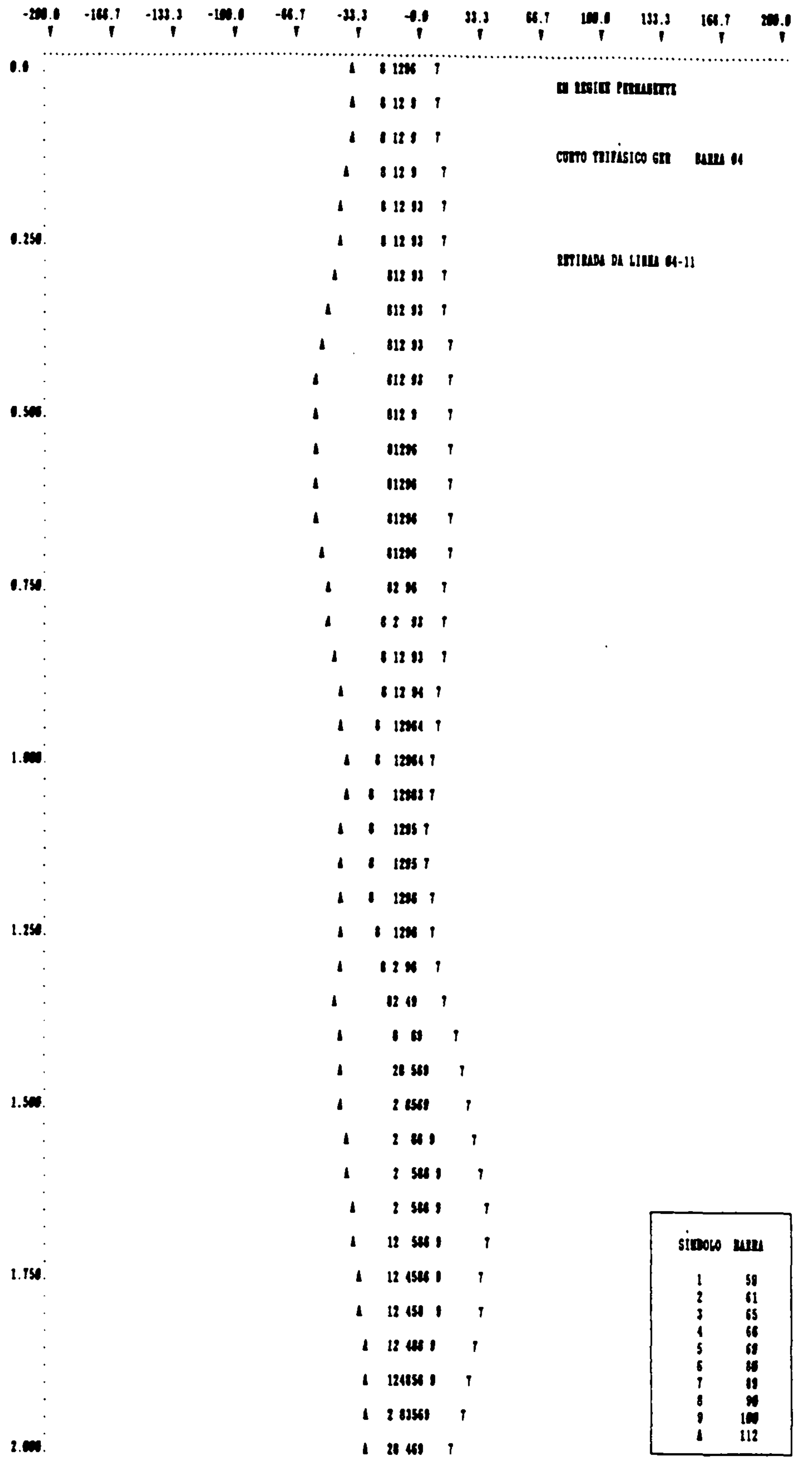


FIGURA 8.b. - Curvas de oscilação das máquinas síncronas para a contingência mais crítica (contingência 8), após redespacho de geração, obtidas por simulação com o TRANSDIR - Caso estável (continuação).

7.3.2. Testes Considerando um Percentual Máximo de Potência a Ser Realocada Por Máquina de 10%

A seguir são apresentados dois testes de correção de segurança dinâmica. O primeiro é feito seguindo os exemplos anteriores, ou seja, o processo iterativo é definido utilizando-se o conceito de EDMS. No segundo teste, procurar-se-á maximizar a margem de segurança do sistema ($\mathcal{M}$) em cada iteração.

7.3.2.1. Testes Utilizando o Conceito de EDMS

Mostram-se abaixo os resultados da análise e correção de segurança dinâmica considerando-se uma faixa permissível de realocação mais estreita comparada aos testes feitos anteriormente. O percentual adotado corresponde a 10%. Isto é feito com o propósito de se avaliar o comportamento da metodologia para deslocamentos menores da margem de segurança do sistema.

Os outros parâmetros adotados são iguais àqueles dos exemplos anteriores.

Para se atingir o objetivo proposto ($\mathcal{M} \geq \mathcal{M}_{mín} = 0,3$), far-se-á a correção em dois passos, assim definidos:

Passo 1. Margem de segurança inicial $\mathcal{M}^0 = -0,86$

Adota-se margem de segurança alvo $\mathcal{M}_A = -0,2$

e, consequentemente, EDMS = 0,55

<u>Passo 2</u>. Margem de segurança inicial $\mathcal{M}^0$ = -0,2

Adota-se margem de segurança alvo $\mathcal{M}_A$ = 0,3

e, conseqüentemente, EDMS = 0,71.

Os redespachos de geração e resultados da análise de estabilidade para os <u>Passo 1</u> e <u>Passo 2</u> são apresentados nas tabelas 9, 10, 11 e 12. Neste caso, a margem de segurança do sistema ($\mathcal{M}$) obtida foi 0,342.

TABELA 9. – Despacho básico e redespacho de geração com limite de geração de 10% - Passo 1.

Número da Barra	Despacho Básico (pu)	Redespacho de Geração (pu)
4	-0,108	0,000
10	7,200	-0,604
12	1,020	0,000
25	0,880	0,000
26	3,760	0,000
27	-0,100	0,000
31	0,084	0,004
40	-0,550	0,000
42	-0,700	0,000
49	2,440	0,000
59	1,860	0,000
61	1,920	0,000
65	4,690	0,000
66	4,700	0,000
69	6,076	0,000
80	5,280	0,000
89	7,820	0,600
90	-1,020	0,000
100	3,020	0,000
112	-0,510	0,000

TABELA 10. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Passo 1.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade							
N.º Da Contingência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado				Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segurança
		Barra Origem	Barra Destino		Circuito		
		N.º	Nome	N.º	Nome			
8	4	4	11	1	9,0	-0,068
16	30	30	38	1	10,2	0,201
9	11	11	12	1	13,2	0,507
12	17	17	113	1	15,6	0,672
19	49	49	50	1	16,8	0,756
1	26	26	25	1	16,2	0,757
20	108	108	109	1	18,6	0,771
11	15	15	17	1	21,6	0,804
2	26	26	30	1	18,6	0,836
7	3	3	5	1	25,2	0,844
3	42	42	40	1	22,8	0,883
4	42	42	41	1	23,4	0,893
5	1	1	2	1	37,2	0,902
6	2	2	12	1	36,6	0,905
10	13	13	15	1	42,6	0,915
13	42	42	49	1	24,0	0,937
15	27	27	115	1	55,8	0,980
17	29	29	31	1	NFE	NFE
14	10	10	9	1	NFE	NFE
18	36	36	35	1	NFE	NFE
Tempo de Eliminação de Defeito = 09 ciclos						

TABELA 11. – Despacho inicial e o redespacho de geração com limite de geração de 10% - Passo 2.

Número da Barra	Despacho Inicial (pu)	Redespacho de Geração (pu)
4	-0,108	0,000
10	6,590	-0,587
12	1,020	0,000
25	0,880	0,000
26	3,760	0,000
27	-0,100	0,000
31	0,088	0,000
40	-0,550	0,000
42	-0,700	0,000
49	2,440	0,000
59	1,860	0,000
61	1,920	0,000
65	4,690	0,000
66	4,700	0,000
69	6,157	0,000
80	5,280	0,000
89	8,420	0,587
90	-1,020	0,000
100	3,020	0,000
112	-0,510	0,000

TABELA 12. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Passo 2.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade								
Nº Da Contingência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado					Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segurança
		Barra Origem		Barra Destino		Circuito		
		Nº	Nome	Nº	Nome			
8	4	4		11		1	11,4	0,342
16	30	30		38		1	15,0	0,634
19	49	49		50		1	15,6	0,695
9	11	11		12		1	16,2	0,696
20	108	108		109		1	17,4	0,744
2	26	26		30		1	16,8	0,790
12	17	17		113		1	21,0	0,822
1	26	26		25		1	18,6	0,822
4	42	42		41		1	22,2	0,878
11	15	15		17		1	31,8	0,885
3	42	42		40		1	24,0	0,896
7	3	3		5		1	36,6	0,903
6	2	2		12		1	58,2	0,926
13	42	42		49		1	24,0	0,936
15	27	27		115		1	56,4	0,981
18	36	36		35		1	NFE	NFE
17	29	29		31		1	NFE	NFE
5	1	1		2		1	NFE	NFE
10	13	13		15		1	NFE	NFE
14	10	10		9		1	NFE	NFE
Tempo de Eliminação de Defeito = 09 ciclos								

Observa-se, neste exemplo, que mesmo com um desvio em relação ao valor esperado no passo 1, ao final do passo 2 a meta de $\mathbb{M} \geq 0,3$ foi atingida. Para isto foi necessária a realocação de 119,7 MW (considerando-se os passos 1 e 2).

7.3.2.2. Testes Efetuados Maximizando-se a Margem de Segurança do Sistema à Cada Passo

Neste exemplo buscar-se-á corrigir a margem de segurança do sistema a cada passo para um valor máximo possível, dentro do limite de geração imposto. Para isto, usando-se o programa computacional desenvolvido, é suficiente exigir-se um alto valor de margem. Neste caso, a melhoria na segurança é limitada pela máxima variação de geração em cada máquina. Além disso, colocado o problema desta forma, não se definem os valores dos parâmetros margem de segurança alvo e $\mathcal{E}$ intermediários. Note-se que o objetivo permanece sendo $\mathbb{M} \geq 0,3$.

O ponto de partida adotado corresponde ao caso base e o redespacho é mostrado na tabela 13. Os resultados da análise de estabilidade encontram-se na tabela 14. A margem de segurança do sistema encontrada vale 0,0. Em vista deste valor ser inferior a $\mathcal{M}_{mín}$, um novo passo faz-se necessário. Portanto, efetuando-se um novo redespacho a partir do despacho do passo 1, obtém-se os resultados da análise de estabilidade transitória que estão relacionados na tabela 16. A margem de segurança do sistema é $\mathbb{M} = 0,489$, que é maior que a meta 0,3.

O processo iterativo pode ser finalizado uma vez que o objetivo foi alcançado.

No exemplo apresentado o critério adotado foi a maximização da segurança. Isto foi obtido, mas a um custo de realocação de 418,1 MW, que implica em um maior deslocamento do ponto de operação do sistema.

Do ponto de vista prático é mais interessante adotar-se um valor mínimo de margem, capaz de garantir uma folga operativa conveniente, exigindo-se com isto mínima mudança do ponto de operação.

TABELA 13. – Despacho básico e o redespacho de geração com limite de geração de 10% e máximo deslocamento possível da margem – Passo 1.

Número da Barra	Despacho Básico (pu)	Redespacho de Geração (pu)
4	-0,108	0,000
10	7,200	-0,720
12	1,020	-0,102
25	0,880	0,088
26	3,760	-0,376
27	-0,100	0,000
31	0,084	0,008
40	-0,550	0,000
42	-0,700	0,000
49	2,440	0,147
59	1,860	0,186
61	1,920	0,096
65	4,690	-0,469
66	4,700	-0,470
69	6,076	0,000
80	5,280	0,528
89	7,820	0,782
90	-1,020	0,000
100	3,020	0,302
112	-0,510	0,000

TABELA 14. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Passo 1.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade								
N.º Da Contingência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado					Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segurança
		Barra Origem		Barra Destino		Circuito		
		N.º	Nome	N.º	Nome			
8	4	4		11		1	9,0	0,000
16	30	30		38		1	10,8	0,307
9	11	11		12		1	13,2	0,528
12	17	17		113		1	16,2	0,695
19	49	49		50		1	16,2	0,730
20	108	108		109		1	17,4	0,739
11	15	15		17		1	24,0	0,833
1	26	26		25		1	19,8	0,851
7	3	3		5		1	27,0	0,859
2	26	26		30		1	21,0	0,879
4	42	42		41		1	23,4	0,888
3	42	42		40		1	24,0	0,896
6	2	2		12		1	35,4	0,900
5	1	1		2		1	41,4	0,912
10	13	13		15		1	51,0	0,928
13	42	42		49		1	24,0	0,935
15	27	27		115		1	56,4	0,982
18	36	36		35		1	NFE	NFE
14	10	10		9		1	NFE	NFE
17	29	29		31		1	NFE	NFE
Tempo de Eliminação de Defeito = 09 ciclos								

TABELA 15. – Despacho e o redespacho de geração com limite de geração de 10 e máximo deslocamento possível da margem. - Passo 2.

Número da Barra	Despacho Inicial (pu)	Redespacho de Geração (pu)
4	-0,108	0,000
10	6,480	-0,648
12	0,918	-0,092
25	0,960	0,010
26	3,380	-0,049
27	-0,100	0,000
31	0,092	0,009
40	-0,550	0,000
42	-0,700	0,000
49	2,580	-0,258
59	2,040	0,204
61	2,010	-0,201
65	4,220	-0,422
66	4,230	-0,423
69	6,157	0,000
80	5,808	0,580
89	8,600	0,860
90	-1,020	0,000
100	3,320	0,332
112	-0,510	0,000

TABELA 16. - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Passo 2.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade						
Nº Da Contingência	Barra Em Curto	Linha de Transmissão / Trafo Retirado			Tempo Crítico (ciclos)	Margem De Segurança
		Barra Origem	Barra Destino	Circuito		
		Nº Nome	Nº Nome			
8	4	4	11	1	12,6	0,489
16	30	30	38	1	15,0	0,650
19	49	49	50	1	16,2	0,718
20	108	108	109	1	17,4	0,723
9	11	11	12	1	18,0	0,751
12	17	17	113	1	21,0	0,818
2	26	26	30	1	19,2	0,853
1	26	26	25	1	20,4	0,855
3	42	42	40	1	24,0	0,895
4	42	42	41	1	24,0	0,895
11	15	15	17	1	37,8	0,895
7	3	3	5	1	43,2	0,903
13	42	42	49	1	22,8	0,918
15	27	27	115	1	90,0	0,927
17	29	29	31	1	57,0	0,981
18	36	36	35	1	NFE	NFE
5	1	1	2	1	NFE	NFE
10	13	13	15	1	NFE	NFE
6	2	2	12	1	NFE	0,928
14	10	10	9	1	NFE	NFE
Tempo de Eliminação de Defeito = 09 ciclos						

7.4. Análise dos Resultados

Nos testes apresentados, foram utilizados o conceito de EDMS e percentuais de 10 e 15% da potência nominal de geração como limitantes da solução do problema.

Os percentuais de 10 e 15% foram adotados no caso dos exemplos correspondentes ao sistema IEEE 118 Barras. Com o percentual de 15% foi possível corrigir a margem de segurança do sistema de $\mathbb{M}$ = -0,86 para 0,30 em um único passo com um erro inferior a 0,05 e potência total redespachada igual a 107,1 MW. A potência total redespachada é definida neste trabalho como sendo o somatório dos valores positivos realocados nas máquinas do sistema.

Para o caso do percentual de 10%, o objetivo foi atingido com dois passos, considerando-se dois casos:

Caso A. Limitação através do uso do conceito de EDMS com valor menor ($\mathcal{E}$ = 0,55 para o passo 1 e $\mathcal{E}$ = 0,71 para o passo 2) que aquele estabelecido no critério 2.

Caso B. Determinação de um redespacho de geração, a cada passo, dentro do espaço de restrições, tal que maximize a margem de segurança do sistema.

No caso A, o objetivo foi alcançado com potência total redespachada igual a 119,1 MW, enquanto que, no caso B foi preciso redespachar 418,1 MW.

Destes resultados pode-se concluir o seguinte:

1. As sucessivas linearizações de acordo com o critério 2 e limite de geração

mais relaxado, levou a um valor de potência total redespachada inferior às outras alternativas com um número menor de máquinas participantes.

2. Para o caso de maximização da margem de segurança do sistema a cada passo, tem-se um maior valor de potência total redespachada e maior número de máquinas participantes, sem uma efetiva melhoria dos resultados. Isto pode ser facilmente verificado, comparando-se os resultados correspondentes ao passo 1 dos casos A e B, para os quais obteveram-se margens de segurança do sistema iguais a -0,068 e 0,0, através de potências redespachadas de 60,4MW e 213,5 MW, respectivamente.

Do ponto de vista de um sistema elétrico, são usados critérios diversos para a escolha do ponto de operação. No entanto, se uma margem mínima de segurança é adotada, o deslocamento do ponto de operação é mínimo, afetando-se, assim, o menos possível o novo ponto de operação calculado. Também, altera-se o menos possível o valor do critério associado à operação do sistema, neste caso.

7.5. Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das aplicações da metodologia proposta para o controle de segurança dinâmica, tomando-se dois sistemas testes: um sistema baseado na configuração da região sul do Brasil, com 45 barras, 10 geradores e 73 linhas e transformadores e, o sistema IEEE constituido por 118 barras, 20 geradores e 179 linhas de transmissão e transformadores.

A ação de controle adotada foi o redespacho de geração, determinado através de programação linear, com o propósito de tornar menor possível o deslocamento de potência em torno do estado nominal.

O uso do conceito de EDMS atendeu dois objetivos, ou seja, a definição do tamanho do passo para o processo iterativo, quando se tratar de grandes desvios da margem de segurança do sistema (M) e redução do número de contingências a serem observadas para fins do redespacho de geração, resultando numa economia do tempo de cálculo. Basicamente visou-se com isto a obtenção de um número adequado de iterações, diminuindo-se conseqüentemente esforços computacionais.

A importância deste critério pôde ser verificada no primeiro exemplo, onde se selecionou as quatro primeiras contingências da ordenação apresentada na Tabela 1. A contingência 16 é a quinta desta lista, a qual teve, após o redespacho, um decréscimo no valor de sua margem, porém ficando com um valor ainda superior a $M_{mín}$; por conseguinte torna-se dispensável a efetiva monitoração desta contingência e as demais que seguem na lista.

Nota-se nos resultados mostrados acima, que o posicionamento da margem de segurança do sistema é satisfatório, com desvios que não ultrapassaram a 0,05.

Deste modo, os testes apresentados atingiram os ojetivos propostos do ponto de vista da precisão.

A forma adotada, neste trabalho, para a determinação do redespacho, baseada na minimização do desvio de potência em relação ao seu valor nominal, é eficiente, se o passo para o processo iterativo for controlado utilizando-se o conceito de EDMS e limite de geração tomado em valores que levem em conta a limitação real das máquinas. Neste caso, o algoritmo obtém uma solução priorizando a realocação de geração de acordo com o perfil de sensibilidade da margem de segurança. Caso se deseje efetuar o redespacho utilizando-se um espaço de restrições de geração baseado em um pequeno percentual a cada iteração, o algoritmo deverá ser novamente empregado ou reduzida a magnitude do EDMS para um valor inferior ao estabelecido no critério 2, como foi utilizado no exemplo correspondente ao caso A, conseqüentemente, aumentando-se o número de passos do processo iterativo.

A escolha adequada dos parâmetros $\mathcal{E}$ e $\mathcal{M}_{min}$ deverá ser feita com auxílio da experiência operativa com o programa. Esta escolha poderá variar de sistema para sistema.

Não foi possível até agora descobrir-se uma relação matemática entre os erros cometidos e o número de passos do algoritmo.

Deve-se notar também que existirão situações para as quais o programa não produzirá um redespacho, tal que a margem especificada seja atingida. Neste caso, o programa fornecerá o melhor redespacho que ele é capaz de gerar.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

8.1. Conclusões

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para o controle de segurança de Sistemas de Energia Elétrica considerando-se a estabilidade transitória, faltas tipo curto-circuito e ações de controle baseados nó redespacho de geração.

A análise de estabilidade transitória é efetuada através do método SLEP, cujo modelo dinâmico é expresso em função do estado do sistema referido ao centro de ângulos e a potência elétrica determinada considerando-se a preservação da topologia da rede original, de acordo com o esquema proposto por Fonseca & Decker [19].

O controle de segurança dinâmica é desenvolvido a partir do cálculo de sensibilidade da margem de segurança com relação ao vetor posição angular pré-falta referido ao centro de ângulos (θ^a).

Este procedimento, possibilita a formulação do problema de controle utilizando-se as várias alternativas disponíveis, *e.g.*, redespacho de geração, corte de carga, mudança topológica da rede, uso de compensadores, etc., bastando, apenas utilizar transformações apropriadas.

No presente trabalho, o controle de segurança foi efetuado através do redespacho de geração, cuja transformação empregada corresponde ao uso da matriz Jacobiana **HEQ** e equação (6.2.10). Deste modo é possível corrigir-se, preventivamente, a(s) margem(ns) de segurança com sobrecarga(s), mudando-as para valor(es) considerado(s) seguro(s). O redespacho usado atende a um critério de mínimo deslocamento do estado nominal de geração, através de programação linear.

O procedimento para o cálculo da sensibilidade da margem de segurança foi baseado no uso de séries de Taylor. Assim, a precisão do resultado poderá ser controlada 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. Estes fatores foram fundamentais para o desenvolvimento do algoritmo proposto neste trabalho.

Testes computacionais utilizando-se o redespacho da geração, ilustraram os resultados obtidos conforme pôde-se observar em exemplos efetuados com sistemas compostos por 10 e 20 máquinas síncronas.

Neste trabalho, introduziu-se o conceito de **esforço de deslocamento da margem de segurança**. Este conceito foi usado para definir o tamanho do passo para o processo iterativo de linearizações sucessivas, nos casos em que o deslocamento da margem de segurança é expressivo. Foi usado, também, para a determinação do conjunto de contingências em sobrecarga, que deve definir as restrições de estabilidade a ser incluídas no problema de programação linear.

8.2. Sugestões Para Futuros Trabalhos

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, são sugeridos os seguintes tópicos para futuros trabalhos:

- Melhoria do programa computacional para o cálculo da sensibilidade da margem de segurança, bem como do algoritmo para redespacho de geração;
- Solução do problema de redespacho de geração formulado através de um problema de programação não-linear, por exemplo, adotando-se como função objetivo funções tipo quadrática;
- Considerar no algoritmo de redespacho a possibilidade do uso do corte de carga nos casos de solução inviável;
- Desenvolvimento de algoritmo para controle de segurança através da mudança topológica da rede
- Desenvolvimento de algoritmo para controle de segurança utilizando-se compensadores estáticos, transformadores defasadores em redes de transmissão e elos emj corrente contínua;
- Desenvolvimento de algoritmo de controle de segurança baseado na potência reativa;
- Desenvolvimento de algoritmo para determinação dos máximos intercâmbio entre áreas, levando-se em conta a estabilidade transitória;
- Finalmente, o desenvolvimento de um procedimento eficiente e capaz de integrar as várias alternativas de controle acima mencionadas.

REFERÊNCIAS

[01] ANDERSON, P. M. and FOUAD, A. A. - Power System Control And Stability, Iowa State University Press, 1977, pp. 28 - 29.

[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] AYLETT, P. D. - The Energy - Integral Criterion Of Transient Stability Limits of Power Systems, The Institution of Electrical Engineers, 1958, Monograph No. 3085, pp. 527 - 536.

[05] 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.

[06] BREWER, J. W. - Kronecker Products And Matrix Calculus In System Theory, IEEE Trans. Circuits and Systems, 1978, Vol. CAS-25, No. 9, pp. 772 - 781.

[07] BOSE, A. - Application of Direct Methods to Transient Stability Analysis of Power Systems, IEEE Trans. PAS, 1984, Vol. PAS - 103, No. 7, pp. 1629 - 1636.

[08] CABREIRA, M. F. R. - Análise e Correção da Segurança Usando Estabilidade Transitória, Dissertação de Mestrado, 1985, GPGEE / UFSC, Florianópolis-SC, Brasil.

[09] CASTI, J. L. - Nonlinear System Theory, 1985, Academic Press, Inc, USA.

[10] CARVALHO, M. F., SOARES, S. and OHISHI, J. - Optimal Active Power Dispatch By Network Flow Approach, IEEE Trans. Power Systems, 1988, vol.3, No. 4, pp. 1640 - 1647.

[11] CHAN, S. M. and YIP, E. - A Solution of the Transmission Limited Dispach Problem By Sparse Linear Programming, IEEE Trans. Power Systems, 1979, Vol. PAS-98, No. 3, pp. 1044 - 1053.

[12] CHANDRASHEKHAR, K. S. - Online Correction Dispatch Algorithm For Dynamic Security, IEE Proceedings, 1985, Vol. 132, Pt. C. No. 1, pp. 20 - 22.

[13] CHANDRASHEKHAR, K. S. and HILL, D.J. - Dynamic Security Dispatch: Basic Formulation, IEEE Trans. PAS, 1983, Vol.PAS - 102, No.7, pp. 2145 - 2152.

[14] DY LIACCO, T. E. - System Security: The Computer's Role, 1978, IEEE Spectrum, pp. 43 - 50.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] FONSECA, L. G. S. - Determinação de Domínios de Estabilidade Para Uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência, Tese DSc., 1976, COPPE/UFRJ.

[19] FONSECA, L. G. S. and DECKER, I. C. - Iterative Algorithm For Critical Energy Determination in Transient Stability of Power System, IFAC - Symposium Planning & Operation in Electric Energy System, 1985, Rio de Janeiro - RJ, Brazil, pp. 483 - 489.

[20] 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.

[21] FONSECA, L. G. S.; MINUSSI, C. R. e COLVARA, L. D. - Melhoria da Segurança em Sistemas de Potência Considerando a Estabilidade Transitória, IV SBA, 1982, Campinas- SP, Brasil, pp. 433 - 438.

[22] FONSECA, L. G. S. e MINUSSI, C. R. - Correção de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica Considerando-se Faltas Tipo

Curto-Circuito, (1989), VIII Congresso Chileno de Engenharia, Chile.

[23] FONSECA, L. G. S. e MINUSSI, C. R. - Redespacho de Geração Para Controle de Segurança Dinâmica em Sistema de Energia Elétrica Através de Análise de Sensibilidade, Trabalho a ser apresentado no 8º CBA, 1990, Belém - PA.

[24] FONSECA, L. G. S.; SAVI, T. C. O. e MOROZOWSKI Fº, M. - Redespacho da Geração Visando Melhoria da Segurança, IV CBA, 1982, Campinas - SP, Brasil, pp. 502 - 507.

[25] FOUAD, A. A. and STANTON, 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.

[26] FRANK, P. M. - Introduction To System Sensitivity Theory", Academic Press, 1978, N. York.

[27] GASS, S. I. (1975). - Linear Programming: Methods & Applications, 1975, Mc Graw-Hill, USA.

[28] KITAMURA, S.; DOHNOMOTO, S. and KUREMATSU, Y. - Construction Of a Lyapunov Function By The Perturbation Method And Its Application To The Transient Stability Problem of Power Systems With Non-Negligible Transfer Conductances, 1977, Int. Journal Control, Vol. 26, No. 3, pp. 405 - 420.

[29] LACARNA, R. J. and JOHNSON, J. R. - Optimal Rescheduling For Power System Security Via Pattern Recognition And Search Methods", IEEE Trans. Systems, Man And Cybernetics, 1979, Vol. SMC - 9, No.5, pp. 293 - 296.

[30] LEMMON, W. W.; MAMANDUR, K. R. C. and BARCELO, W. R. - Transient Stability Prediction And Control in Real-time By QUEP, IEEE Trans. Power Systems, 1989, Vol.4, No. 2, pp. 627 - 642.

[31] LUENBERGER, D. W. - Introduction to Linear and Nonlinear Programming, 1973, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

[32] MAGNUSSON, P. C. - The Transfer - Energy Method Of Calculation Stability", AIEE Transactions, 1947, Vol. 66, pp. 747 - 755.

[33] MIKOLINAS T.A. and WOLLENBERG, B. F. - An Advanced Contingency Selection Algorithm, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-100, No. 2, 1981, pp. 608 - 617.

[34] MINUSSI, C. R. - Realocação de Geração e Alívio de Carga Para Eliminação de Sobrecargas considerando a Estabilidade Transitória e Programação Linear, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1981.

[35] MINUSSI, C. R. - Estabilidade Transitória de Sistemas de Energia Elétrica: Uma abordagem de Análise Via Análise Modal, 7º Congresso Brasileiro de Automática, 1988, pp. 801 - 806.

[36] MINUSSI, C. R. - Um método Rápido de Análise de Transitórios Eletromecânicos de Sistemas de Energia Elétrica, X Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1989, CTBA/GSP,39.

[37] OPOKU, G. - Optimal Power System VAR Planning, IEEE Trans.Power Systems, 1990, Vol. - 5, No. 1, pp. 53 - 60.

[38] PAI, M. A. - Power System Stability, 1981, North Holland Control Series.

[39] PAI, M. A. and VARWANDKAR, S. D. - On The Inclusion of Transfer Conductances in Liapunov Functions For Multimachine Power Systems, 1977, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC - 22, pp. 983 - 985.

[40] RIBBENS-PAVELLA, M.; LEMAL, B. and PIRARD, W. - On-line Operation Of Liapunov Criterion For Transient Stability Studies, 1977, Proc. IFAC Symp., Australia, pp. 292 - 296.

[41] 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.

[42] RIBBENS-PAVELLA, M.; VAN CUTSEM, TH. and ROUSSEAUX, P. - On-line Stability And Dynamic Systems, IFAC - Symposium Planning & Operation In Electric Energy System, 1985, Rio de Janeiro - RJ, Brazil, pp. 23 - 33.

[43] STOTT, B.; ALSAÇ, O. and MONTICELLI, A. J. – Security Analysis And Optimization, Proceedings Of The IEEE, 1987, No. 75, No. 12, pp. 1623 - 1644.

[44] STOTT, B. and MARINHO, J. L. - Linear Programming For Power System Network Security Applications, IEEE Trans.PAS, 1979, Vol. PAS - 98, pp. 837 - 848.

[45] TALUKDAR, S. N. and WU, F. F. - Computer-Aided Dispatch For Electric Power Systems, Proc. of The IEEE, 1981, Vol. 69, No. 10, pp. 1212 - 1231.

[46] 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.

[47] VIDYASAGAR, M. - Nonlinear Systems Analysis", Prentice-Hall Networks Series, 1978, USA.

[48] VITTAL, V. and ZHOU E-Z. & HWANG, C. & 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.

[49] XUE, Y.; VAN CUTSEM, 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.

[50] XUE, Y. and RIBBENS-PAVELLA, M. - Extended Equal Area Criterion: An Analytical Ultra - Fast Method For Transient Stability Assessement And Preventive Control Of Power Systems, Electrical Power & Energy Systems, 1989, Vol. 11, No. 2, pp. 131 - 149.

[51] KAKIMOTO, N., OHSAWA, Y and HAYASHI, M. - Transient Stability Analysis Of Electric Power System Via Lur'e Type Lyapunov Function, Part I, IEE of Japan, Vol. 98-E, No. 5/6, pp. 63 - 79, 1978.

APÊNDICE A

Algoritmo Computacional - Método SLEP (Fonseca & Decker [19])

Passo 1. Inicialização:

$$\begin{cases} Emáx \leftarrow 0 \\ Emín \leftarrow 0 \\ i \leftarrow 0 \quad \text{(contador de iterações).} \end{cases}$$

Passo 2. Determinar a trajetória de falta, $\mathbf{X}(t) = [\theta(t)^T \ \omega(t)^T]^T$, até que esta encontre a SLEP, ou seja,

$$< \mathbf{g}(\theta(t^*)) \ , \ (\theta(t^*) - \theta^p) > = 0$$

O ângulo correspondente é definido como sendo $\theta^{*(i)}$.

- Se $\exists \ \theta^{*(i)}$, então, ir ao passo 3.
- Do contrário, considere que o sistema é estável para a contingência analisada e vá ao final do programa.

Passo 3. Faça:

$$Ecrít^{(i)} \leftarrow Ep(\theta^{*(i)})$$

<u>**Passo 4.**</u> Calcular $t_{crit}^{(i)}$ correspondente, na trajetória sob falta à:

$$E(\theta,\omega) \longleftarrow E_{crit}^{(i)}$$

<u>**Passo 5.**</u> Se $i > i_{máx}$ (n.º máximo de iterações), então, vá ao passo 12. Do contrário, vá ao passo 6.

<u>**Passo 6.**</u> Faça:

$$i \longleftarrow i + 1 \ .$$

<u>**Passo 7.**</u> Calcular a trajetória pós-falta, iniciando-se em $X(t_{crit}^{(i-1)})$, até que:

$$< g(\theta) \ , \ (\theta - \theta^{p}) > \ = 0$$

O vetor posição angular obtido é definido por $\theta^{*(i)}$.

- Se $\exists\ \theta^{*(i)}$, faça:
  $E_{máx} \leftarrow E_{crit}^{(i-1)}$ e vá ao passo 8.

- Se não, faça:
  $E_{mín} \leftarrow E_{crit}^{(i-1)}$ e vá ao passo 8.

<u>**Passo 8.**</u> Faça:

$$E_{crit}^{(i)} \longleftarrow \frac{E_{máx} + E_{mím}}{2}$$

<u>**Passo 9.**</u> - Se $E_{crit}^{(i)} > (K\%)\ E_{máx}$ e $E_{mín} > (K\%)\ E_{crit}^{(i)}$, considerar que o procedimento iterativo convergiu e vá ao passo 11.

- Se não, vá ao passo 10.

Passo 10. ▪ Se $E_{máx} \neq 0$, então, vá ao passo 4.

- Se não, faça:

$$E_{crít}^{(i)} \leftarrow 1,25\ E_{crít}^{(i-1)}$$

e vá para o passo 4.

Passo 11. Calcular $t_{crít}^{(i)}$ correspondente a $E(\theta,\omega) = E_{crít}^{(i)}$.

Passo 12. Considerar $E_{crít}^{(i)}$ e $t_{crít}^{(i)}$ como sendo, respectivamente, **energia crítica** e **tempo crítico** para a contingência analisada. Finalizar.

APÊNDICE B

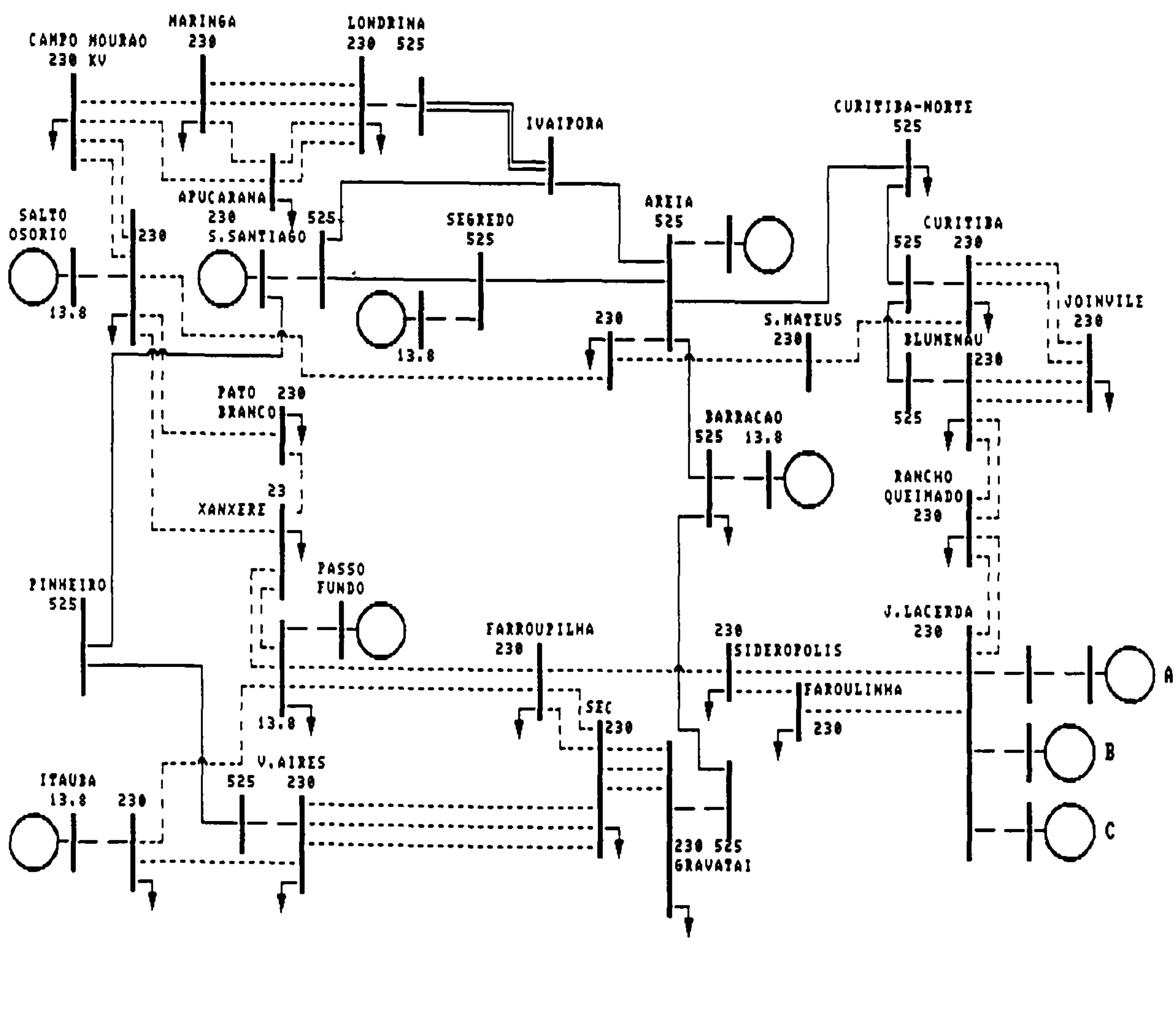


FIGURA 9. - Diagrama unifilar do sistema baseado na configuração da região sul do Brasil - Sistema de 10 máquinas.

TABELA 17. - Dados do sistema de transmissão (Sistema teste de 10 máquinas).

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
343	IVAIPORA.525	344	LONDRINA.525	0.070	1.450
343	IVAIPORA.525	344	LONDRINA.525	0.070	1.450
343	IVAIPORA.525	382	AREIA.525	0.180	2.270
343	IVAIPORA.525	391	S.SANTIAG525	0.140	2.040
344	LONDRINA.525	343	IVAIPORA.525	0.070	1.450
344	LONDRINA.525	343	IVAIPORA.525	0.070	1.450
344	LONDRINA.525	431	LONDRINA.230	0.0	0.630
366	BARRACAO13.8	386	BARRACAO.525	0.0	1.360
367	SIDEROPOL230	368	FARROUPIL230	3.860	19.850
367	SIDEROPOL230	396	J.LACERDA230	0.960	4.910
367	SIDEROPOL230	437	FORQUILHI230	0.330	1.670
368	FARROUPIL230	367	SIDEROPOL230	3.860	19.850
368	FARROUPIL230	370	P.FUNDO.230	4.630	23.780
368	FARROUPIL230	370	P.FUNDO.230	4.630	23.780
368	FARROUPIL230	399	CECI.230	1.770	9.100
368	FARROUPIL230	399	CECI.230	1.770	9.100
368	FARROUPIL230	399	CECI.230	1.770	9.100
369	P.FUNDO.13.8	370	P.FUNDO.230	0.0	4.600
370	P.FUNDO.230	368	FARROUPIL230	4.630	23.780
370	P.FUNDO.230	368	FARROUPIL230	4.630	23.780
370	P.FUNDO.230	369	P.FUNDO.13.8	0.0	4.600
370	P.FUNDO.230	371	XANXERE.230	1.630	8.350
370	P.FUNDO.230	371	XANXERE.230	1.630	8.350
370	P.FUNDO.230	408	ITAUBA.230	2.500	15.480
371	XANXERE.230	370	P.FUNDO.230	1.630	8.350
371	XANXERE.230	370	P.FUNDO.230	1.630	8.350
371	XANXERE.230	372	P.BRANCO.230	1.630	8.350
371	XANXERE.230	374	S.OSORIO.230	3.160	16.210
372	P.BRANCO.230	371	XANXERE.230	1.630	8.350
372	P.BRANCO.230	374	S.OSORIO.230	1.530	8.610
373	S.OSORIO13.8	374	S.OSORIO.230	0.0	1.140

TABELA 17. - Continuação.

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
374	S.OSORIO.230	371	XANXERE.230	3.160	16.210
374	S.OSORIO.230	372	P.BRANCO.230	1.530	8.610
374	S.OSORIO 230	373	S.OSORIO13.8	0.0	1.140
374	S.OSORIO.230	375	AREIA.230	3.060	15.230
374	S.OSORIO.230	433	C.MOURAO.230	3.440	17.600
374	S.OSORIO.230	433	C.MOURAO.230	3.440	17.600
375	AREIA.230	374	S.OSORIO.230	3.060	15.230
375	AREIA.230	376	S.MATEUS.230	2.450	12.560
375	AREIA.230	382	AREIA.525	0.0	3.000
376	S.MATEUS.230	375	AREIA.230	2.450	12.560
376	S.MATEUS.230	377	CURITIBA.230	0.880	4.150
377	CURITIBA.230	376	S.MATEUS.230	0.880	4.150
377	CURITIBA.230	378	JOINVILE.230	1.820	9.350
377	CURITIBA.230	378	JOINVILE.230	1.820	9.350
377	CURITIBA.230	383	CURITIBA.525	0.0	0.620
378	JOINVILE.230	377	CURITIBA.230	1.820	9.350
378	JOINVILE.230	377	CURITIBA.230	1.820	9.350
378	JOINVILE.230	379	BLUMENAU.230	1.540	7.760
378	JOINVILE.230	379	BLUMENAU.230	1.540	7.760
379	BLUMENAU.230	378	JOINVILE.230	1.540	7.760
379	BLUMENAU.230	378	JOINVILE.230	1.540	7.760
379	BLUMENAU.230	380	R.QUEIMAD230	2.160	11.050
379	BLUMENAU.230	380	R.QUEIMAD230	2.160	11.050
379	BLUMENAU.230	385	BLUMENAU.525	0.0	0.620
380	R.QUEIMAD230	379	BLUMENAU.230	2.160	11.050
380	R.QUEIMAD230	379	BLUMENAU.230	2.160	11.050
380	R.QUEIMAD230	396	J.LACERDA230	1.800	9.200
380	R.QUEIMAD230	396	J.LACERDA230	1.800	9.200
381	F.AREIA.13.8	382	AREIA.525	0.0	0.670
382	AREIA.525	343	IVAIPORA.525	0.180	2.270
382	AREIA.525	375	AREIA.230	0.0	3.000
382	AREIA.525	381	F.AREIA.13.8	0.0	0.670
382	AREIA.525	383	CURITIBA.525	0.190	2.800

TABELA 17. - Continuação.

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
382	AREIA.525	384	CUR.NORTE525	0.190	2.740
382	AREIA.525	386	BARRACAO.525	0.140	1.950
382	AREIA.525	398	SEGREDO.525	0.050	0.700
383	CURITIBA 525	377	CURITIBA.230	0.0	0.620
383	CURITIBA.525	382	AREIA.525	0.190	2.800
383	CURITIBA.525	384	CUR.NORTE525	0.050	0.690
383	CURITIBA.525	385	BLUMENAU.525	0.120	1.750
384	CUR.NORTE525	382	AREIA.525	0.190	2.740
384	CUR.NORTE525	383	CURITIBA.525	0.050	0.690
385	BLUMENAU.525	379	BLUMENAU.230	0.0	0.620
385	BLUMENAU.525	383	CURITIBA.525	0.120	1.750
386	BARRACAO.525	366	BARRACAO13.8	0.0	1.360
386	BARRACAO.525	382	AREIA.525	0.140	1.950
386	BARRACAO.525	387	GRAVATAI.525	0.210	3.090
387	GRAVATAI.525	386	BARRACAO.525	0.210	3.090
387	GRAVATAI.525	402	GRAVATAI.230	0.0	0.620
388	V.AIRES.525	389	PINHEIRO.525	0.220	3.000
388	V.AIRES.525	414	V.AIRES.230	0.0	0.620
389	PINHEIRO.525	388	V.AIRES.525	0.220	3.000
389	PINHEIRO.525	391	S.SANTIAG525	0.140	1.950
390	S.SANTIA13.8	391	S.SANTIAG525	0.0	1.140
391	S.SANTIAG525	343	IVAIPORA.525	0.140	2.040
391	S.SANTIAG525	389	PINHEIRO.525	0.140	1.950
391	S.SANTIAG525	390	S.SANTIA13.8	0.0	1.140
391	S.SANTIAG525	398	SEGREDO.525	0.050	0.700
392	J.LAC.A.13.8	393	J.LACERDA138	0.0	8.710
393	J.LACERDA138	392	J.LAC.A.13.8	0.0	8.710
393	J.LACERDA138	396	J.LACERDA230	0.0	5.900
394	J.LAC.B.13.8	396	J.LACERDA230	0.0	7.010
395	J.LAC.C.13.8	396	J.LACERDA230	0.0	4.500
396	J.LACERDA230	367	SIDEROPOL230	0.960	4.910
396	J.LACERDA230	380	R.QUEIMAD230	1.800	9.200
396	J.LACERDA230	380	R.QUEIMAD230	1.800	9.200

TABELA 17. - Continuação.

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
396	J.LACERDA230	393	J.LACERDA138	0.0	5.900
396	J.LACERDA230	394	J.LAC.B.13.8	0.0	7.010
396	J.LACERDA230	395	J.LAC.C.13.8	0.0	4.500
396	J.LACERDA230	437	FORQUILHI230	1.290	6.570
396	SEGREDO.13.8	398	SEGREDO.525	0.0	0.680
398	SEGREDO.525	382	AREIA.525	0.050	0.700
398	SEGREDO.525	391	S.SANTIAG525	0.050	0.700
398	SEGREDO.525	397	SEGREDO.13.8	0.0	0.680
399	CECI.230	368	FARROUPIL230	1.770	9.100
399	CECI.230	368	FARROUPIL230	1.770	9.100
399	CECI.230	368	FARROUPIL230	1.770	9.100
399	CECI.230	402	GRAVATAI.230	0.220	1.110
399	CECI.230	402	GRAVATAI.230	0.220	1.110
399	CECI.230	402	GRAVATAI.230	0.190	1.010
399	CECI.230	414	V.AIRES.230	2.070	9.330
399	CECI.230	414	V.AIRES.230	1.680	9.300
399	CECI.230	414	V.AIRES.230	1.760	9.840
402	GRAVATAI.230	387	GRAVATAI.525	0.0	0.620
402	GRAVATAI.230	399	CECI.230	0.220	1.110
402	GRAVATAI.230	399	CECI.230	0.220	1.110
402	GRAVATAI.230	399	CECI.230	0.190	1.010
407	ITAUBA.13.8	408	ITAUBA.230	0.0	2.360
408	ITAUBA.230	370	P.FUNDO.230	2.500	15.480
408	ITAUBA.230	407	ITAUBA.13.8	0.0	2.360
408	ITAUBA.230	414	V.AIRES.230	2.020	11.290
414	V.AIRES.230	388	V.AIRES.525	0.0	0.620
414	V.AIRES.230	399	CECI.230	2.070	9.330
414	V.AIRES.230	399	CECI.230	1.680	9.300
414	V.AIRES.230	399	CECI.230	1.760	9.840
414	V.AIRES.230	408	ITAUBA.230	2.020	11.290
430	APUCARANA230	431	LONDRINA.230	1.250	6.410
430	APUCARANA230	431	LONDRINA.230	0.890	4.610
430	APUCARANA230	432	MARINGA.230	1.100	11.840

TABELA 17. - Continuação.

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
430	APUCARANA230	433	C.MOURAO.230	2.290	11.740
431	LONDRINA.230	344	LONDRINA.525	0.0	0.630
431	LONDRINA.230	430	APUCARANA230	1.250	6.410
431	LONDRINA.230	430	APUCARANA230	0.890	4.610
431	LONDRINA.230	432	MARINGA.230	1.720	8.840
431	LONDRINA.230	432	MARINGA.230	1.72	8.840
432	MARINGA.230	430	APUCARANA230	1.100	11.840
432	MARINGA.230	431	LONDRINA.230	1.720	8.840
432	MARINGA.230	431	LONDRINA.230	1.720	8.840
432	MARINGA.230	433	C.MOURAO.230	1.810	9.290
433	C.MOURAO.230	374	S.OSORIO.230	3.440	17.600
433	C.MOURAO.230	374	S.OSORIO.230	3.440	17.600
433	C.MOURAO.230	430	APUCARANA230	2.290	11.740
433	C.MOURAO.230	432	MARINGA.230	1.810	9.290
437	FORQUILHI230	367	SIDEROPOL230	0.330	1.670
437	FORQUILHI230	396	J.LACERDA230	1.290	6.570

TABELA 18. - Dados de barras(Sistema teste de 10 máquinas).

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
343	IVAIPORA.525	1.034	-10.87	0.0	0.0	0.0	0.0
344	LONDRINA.525	1.024	-13.11	0.0	0.0	0.0	0.0
366	BARRACAO13.8	1.020	-10.98	0.0	0.0	650.00	-30.14
367	SIDEROPOL230	0.967	-36.58	177.00	68.00	0.0	0.0
368	FARROUPIL230	1.020	-36.27	191.00	42.00	0.0	0.0
369	P.FUNDO.13.8	1.040	-16.84	0.0	0.0	215.00	66.23
370	P.FUNDO.230	1.015	-22.21	171.00	18.50	0.0	0.0
371	XANXERE.230	0.987	-17.72	126.00	47.00	0.0	0.0
372	P.BRANCO.230	0.986	-10.81	46.00	14.70	0.0	0.0
373	S.OSORIO13.8	1.020	5.10	0.0	0.0	1050.00	149.02
374	S.OSORIO.230	1.010	-1.57	281.00	56.50	0.0	0.0

TABELA 18. - Continuação.

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
375	AREIA.230	0.998	-14.94	279.00	60.70	0.0	0.0
376	S.MATEUS.230	0.973	-25.73	130.00	29.40	0.0	0.0
377	CURITIBA.230	0.979	-26.08	427.00	-25.00	0.0	0.0
378	JOINVILE.230	0.923	-32.96	310.00	141.00	0.0	0.0
379	BLUMENAU.230	0.958	-31.56	424.00	90.60	0.0	0.0
380	R.QUEIMAD230	0.967	-33.69	117.00	53.10	0.0	0.0
382	AREIA.525	1.025	-10.24	0.0	0.0	0.0	0.0
381	F.AREIA.13.8	1.022	-6.17	0.0	0.0	1110.00	-13.62
383	CURITIBA.525	0.982	-23.63	0.0	0.0	0.0	0.0
384	CUR.NORTE525	0.984	-22.05	368.00	69.60	0.0	0.0
385	BLUMENAU.525	0.965	-29.44	0.0	0.0	0.0	0.0
386	BARRACAO.525	1.028	-15.81	174.00	-8.20	0.0	0.0
387	GRAVATAI.525	1.032	-32.60	0.0	0.0	0.0	0.0
388	V.AIRES.525	1.034	-25.93	0.0	0.0	0.0	0.0
389	PINHEIRO.525	1.037	-13.34	0.0	0.0	0.0	0.0
390	S.SANTIA13.8	1.018	3.19	0.0	0.0	1325.00	-46.69
391	S.SANTIAG525	1.034	-5.06	0.0	0.0	0.0	0.0
392	J.LAC.A.13.8	1.030	-29.14	0.0	0.0	90.00	44.68
393	J.LACERDA138	0.995	-33.53	126.00	39.80	0.0	0.0
394	J.LAC.B.13.8	1.030	-27.61	0.0	0.0	120.00	52.86
395	J.LAC.C.13.8	1.030	-26.24	0.0	0.0	241.00	87.43
396	J.LACERDA230	0.997	-32.30	0.0	0.0	0.0	0.0
397	SEGREDO.13.8	1.020	0.0	0.0	0.0	1358.00	-57.81
398	SEGREDO.525	1.028	-5.05	0.0	0.0	0.0	0.0
399	CECI.230	1.035	-36.43	813.00	110.00	0.0	0.0
402	GRAVATAI.230	1.044	-35.82	612.00	-455.00	0.0	0.0
407	ITAUBA.13.8	1.000	-15.48	0.0	0.0	490.00	85.62
408	ITAUBA.230	0.987	-22.21	404.00	135.00	0.0	0.0
414	V.AIRES.230	1.040	-28.47	393.00	-111.00	0.0	0.0
430	APUCARANA230	0.990	-18.33	262.00	13.20	0.0	0.0
431	LONDRINA.230	1.009	-15.11	229.00	183.00	0.0	0.0
432	MARINGA.230	0.978	-18.17	184.00	60.20	0.0	0.0

TABELA 18. - Continuação.

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
433	C.MOURAO.230	0.971	-14.66	139.00	53.70	0.0	0.0
437	FORQUILHI230	0.965	-36.37	90.10	55.30	0.0	0.0

TABELA 19. - Dados das máquinas (Sistema de 10 máquinas).

No. MÁQUINA	REATÂNCIA X'd (%)	CONST. INÉRCIA H (s)
366	3,67	30,44
369	10,37	10,56
373	2,84	38,34
381	2,41	62,25
390	2,43	55,24
392	13,52	4,37
394	15,34	6,80
395	8,00	12,50
397	2,16	62,46
407	4,32	20,24

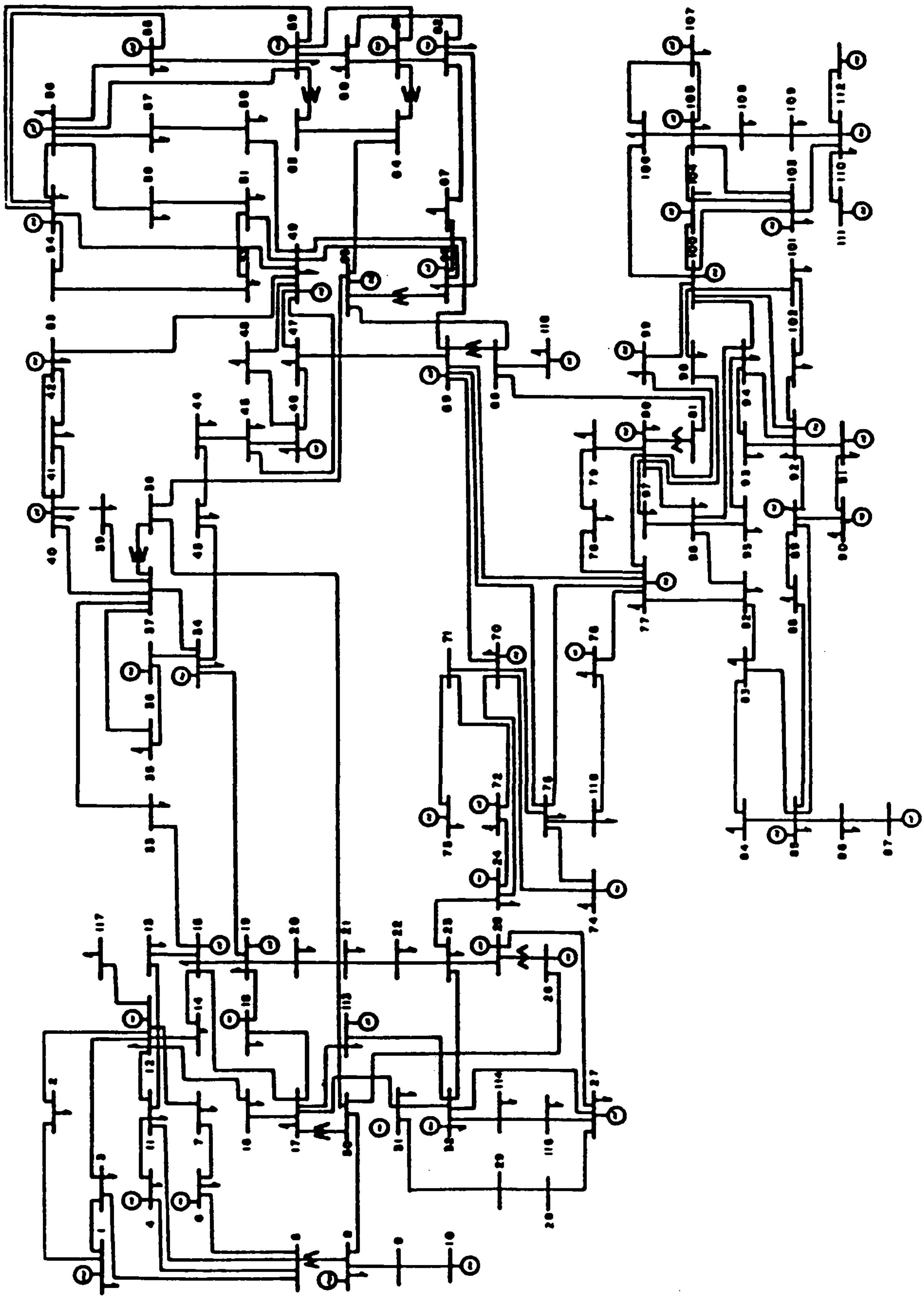


FIGURA 10. - Diagrama unifilar do sistema IEEE 118 Barras.

TABELA 20. - Dados do sistema de transmissão (Sistema IEEE 118 Barras).

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
1		2		3.030	9.990
1		3		1.290	4.240
2		1		3.030	9.990
2		12		1.870	6.160
3		1		1.290	4.240
3		5		2.410	10.800
3		12		4.840	16.000
4		5		0.180	0.800
4		11		2.090	6.880
5		3		2.410	10.800
5		4		0.180	0.800
5		6		1.190	5.400
5		8		0.0	2.670
5		11		2.030	6.820
6		5		1.190	5.400
6		7		0.450	2.080
7		6		0.450	2.080
7		12		0.860	3.400
8		5		0.0	2.670
8		9		0.240	3.050
8		30		0.430	5.040
9		8		0.240	3.050
9		10		0.260	3.220
10		9		0.260	3.220
11		4		2.090	6.880
11		5		2.030	6.820
11		12		0.590	1.960
11		13		2.220	7.310
12		2		1.870	6.160
12		3		4.840	16.000
12		7		0.860	3.400

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
12		11		0.590	1.960
12		14		2.150	7.070
12		16		2.120	8.340
12		117		3.290	14.000
13		11		2.220	7.310
13		15		7.440	24.440
14		12		2.150	7.070
14		15		5.950	19.500
15		13		7.440	24.440
15		14		5.950	19.500
15		17		1.320	4.370
15		19		1.200	3.940
15		33		3.800	12.440
16		12		2.120	8.340
16		17		4.540	18.010
17		15		1.320	4.370
17		16		4.540	18.010
17		18		1.230	5.050
17		30		0.0	3.880
17		31		4.740	15.630
17		113		0.910	3.010
18		17		1.230	5.050
18		19		1.110	4.930
19		15		1.200	3.940
19		18		1.110	4.930
19		20		2.520	11.700
19		34		7.520	24.700
20		19		2.520	11.700
20		21		1.830	8.490
21		20		1.830	8.490
21		22		2.090	9.700
22		21		2.090	9.700
22		23		3.420	15.900

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM No.	NOME	BARRA DESTINO No.	NOME	IMPEDÂNCIA R(%)	X(%)
23		22		3.420	15.900
23		24		1.350	4.920
23		25		1.560	8.000
23		32		3.170	11.530
24		23		1.350	4.920
24		70		10.220	41.150
24		72		4.880	19.600
25		23		1.560	8.000
25		26		0.0	3.820
25		27		3.180	16.300
26		25		0.0	3.820
26		30		0.790	8.600
27		25		3.180	16.300
27		28		1.910	8.550
27		32		2.290	7.550
27		115		1.640	7.410
28		27		1.910	8.550
28		29		2.370	9.430
29		28		2.370	9.430
29		31		1.080	3.310
30		8		0.430	5.040
30		17		0.0	3.880
30		26		0.790	8.600
30		38		0.460	5.400
31		17		4.740	15.630
31		29		1.080	3.310
31		32		2.980	9.850
32		23		3.170	11.530
32		27		2.290	7.550
32		31		2.980	9.850
32		113		6.150	20.300
32		114		1.350	6.120
33		15		3.800	12.440

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
33		37		4.150	14.200
34		19		7.520	24.700
34		36		0.870	2.680
34		37		0.260	0.940
34		43		4.130	16.810
35		36		0.220	1.020
35		37		1.100	4.970
36		34		0.870	2.680
36		35		0.220	1.020
37		33		4.150	14.200
37		34		0.260	0.940
37		35		1.100	4.970
37		38		0.0	3.750
37		39		3.210	10.600
37		40		5.930	16.800
38		30		0.460	5.400
38		37		0.0	3.750
38		65		0.900	9.860
39		37		3.210	10.600
39		40		1.840	6.050
40		37		5.930	16.800
40		39		1.840	6.050
40		41		1.450	4.870
40		42		5.550	18.300
41		40		1.450	4.870
41		42		4.100	13.500
42		40		5.550	18.300
42		41		4.100	13.500
42		49		3.580	16.100
43		34		4.130	16.810
43		44		6.080	24.540
44		43		6.080	24.540
44		45		2.240	9.010

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM No.	NOME	BARRA DESTINO No.	NOME	IMPEDÂNCIA R(%)	X(%)
45		44		2.240	9.010
45		46		4.000	13.560
45		49		6.840	18.600
46		45		4.000	13.560
46		47		3.800	12.700
46		48		6.010	18.900
47		46		3.800	12.700
47		49		1.910	6.250
47		69		8.440	27.780
48		46		6.010	18.900
48		49		1.790	5.050
49		42		3.580	16.100
49		45		6.840	18.600
49		47		1.910	6.250
49		48		1.790	5.050
49		50		2.670	7.520
49		51		4.860	13.700
49		54		3.980	14.500
49		66		0.900	4.590
49		69		9.850	32.400
50		49		2.670	7.520
50		57		4.740	13.400
51		49		4.860	13.700
51		52		2.030	5.880
51		58		2.550	7.190
52		51		2.030	5.880
52		53		4.050	16.350
53		52		4.050	16.350
53		54		2.630	12.200
54		49		3.980	14.500
54		53		2.630	12.200
54		55		1.690	7.070
54		56		0.270	0.950

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM No.	NOME	BARRA DESTINO No.	NOME	IMPEDÂNCIA R(%)	X(%)
54		59		5.030	22.930
55		54		1.690	7.070
55		56		0.480	1.510
55		59		4.730	21.580
56		54		0.270	0.950
56		55		0.480	1.510
56		57		3.430	9.660
56		58		3.430	9.660
56		59		4.070	12.000
57		50		4.740	13.400
57		56		3.430	9.660
58		51		2.550	7.190
58		56		3.430	9.660
59		54		5.030	22.930
59		55		4.730	21.580
59		56		4.070	12.000
59		60		3.170	14.500
59		61		3.280	15.000
59		63		0.0	3.860
60		59		3.170	14.500
60		61		0.260	1.350
60		62		1.230	5.610
61		59		3.280	15.000
61		60		0.260	1.350
61		62		0.820	3.760
61		64		0.0	2.680
62		60		1.230	5.610
62		61		0.820	3.760
62		66		4.820	21.800
62		67		2.580	11.700
63		59		0.0	3.860
63		64		0.170	2.000
64		61		0.0	2.680

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM No.	NOME	BARRA DESTINO No.	NOME	IMPEDÂNCIA R(%)	X(%)
64		63		0.170	2.000
64		65		0.270	3.020
65		38		0.900	9.860
65		64		0.270	3.020
65		66		0.0	3.700
65		68		0.140	1.600
66		49		0.900	4.590
66		62		4.820	21.800
66		65		0.0	3.700
66		67		2.240	10.150
67		62		2.580	11.700
67		66		2.240	10.150
68		65		0.140	1.600
68		69		0.0	3.700
68		81		0.170	2.020
68		116		0.030	0.400
69		47		8.440	27.780
69		49		9.850	32.400
69		68		0.0	3.700
69		70		3.000	12.700
69		75		4.050	12.200
69		77		3.090	10.100
70		24		10.220	41.150
70		69		3.000	12.700
70		71		0.880	3.550
70		74		4.010	13.230
70		75		4.280	14.100
71		70		0.880	3.550
71		72		4.460	18.000
71		73		0.870	4.540
72		24		4.880	19.600
72		71		4.460	18.000
73		71		0.870	4.540

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM No.	NOME	BARRA DESTINO No.	NOME	IMPEDÂNCIA R(%)	X(%)
74		70		4.010	13.230
74		75		1.230	4.060
75		69		4.050	12.200
75		70		4.280	14.100
75		74		1.230	4.060
75		77		6.010	19.990
75		118		1.450	4.810
76		77		4.440	14.800
76		118		1.640	5.440
77		69		3.090	10.100
77		75		6.010	19.990
77		76		4.440	14.800
77		78		0.370	1.240
77		80		1.080	3.310
77		82		2.980	8.530
78		77		0.370	1.240
78		79		0.540	2.440
79		78		0.540	2.440
79		80		1.560	7.040
80		77		1.080	3.310
80		79		1.560	7.040
80		81		0.0	3.700
80		96		3.560	18.200
80		97		1.830	9.340
80		98		2.380	10.800
80		99		4.540	20.600
81		68		0.170	2.020
81		80		0.0	3.700
82		77		2.980	8.530
82		83		1.120	3.660
82		96		1.620	5.300
83		82		1.120	3.660
83		84		6.250	13.200

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM No.	NOME	BARRA DESTINO No.	NOME	IMPEDÂNCIA R(%)	X(%)
83		85		4.300	14.800
84		83		6.250	13.200
84		85		3.020	6.410
85		83		4.300	14.800
85		84		3.020	6.410
85		86		3.500	12.300
85		88		2.000	10.200
85		89		2.390	17.300
86		85		3.500	12.300
86		87		2.820	20.740
87		86		2.820	20.740
88		85		2.000	10.200
88		89		1.390	7.120
89		85		2.390	17.300
89		88		1.390	7.120
89		90		1.580	6.530
89		92		0.790	3.800
90		89		1.580	6.530
90		91		2.540	8.360
91		90		2.540	8.360
91		92		3.870	12.720
92		89		0.790	3.800
92		91		3.870	12.720
92		93		2.580	8.480
92		94		4.810	15.800
92		100		6.480	29.500
92		102		1.230	5.590
93		92		2.580	8.480
93		94		2.230	7.320
94		92		4.810	15.800
94		93		2.230	7.320
94		95		1.320	4.340
94		96		2.690	8.690

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM No.	NOME	BARRA DESTINO No.	NOME	IMPEDÂNCIA R(%)	X(%)
94		100		1.780	5.800
95		94		1.320	4.340
95		96		1.710	5.470
96		80		3.560	18.200
96		82		1.620	5.300
96		94		2.690	8.690
96		95		1.710	5.470
96		97		1.730	8.850
97		80		1.830	9.340
97		96		1.730	8.850
98		80		2.380	10.800
98		100		3.970	17.900
99		80		4.540	20.600
99		100		1.800	8.130
100		92		6.480	29.500
100		94		1.780	5.800
100		98		3.970	17.900
100		99		1.800	8.130
100		101		2.770	12.620
100		103		1.600	5.250
100		104		4.510	20.400
100		106		6.050	22.900
101		100		2.770	12.620
101		102		2.460	11.200
102		92		1.230	5.590
102		101		2.460	11.200
103		100		1.600	5.250
103		104		4.660	15.840
103		105		5.350	16.250
103		110		3.910	18.130
104		100		4.510	20.400
104		103		4.660	15.840
104		105		0.990	3.780

TABELA 20. - Continuação.

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA	
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)
105		103		5.350	16.250
105		104		0.990	3.780
105		106		1.400	5.470
105		107		5.300	18.300
105		108		2.610	7.030
106		100		6.050	22.900
106		105		1.400	5.470
106		107		5.300	18.300
107		105		5.300	18.300
107		106		5.300	18.300
108		105		2.610	7.030
108		109		1.050	2.880
109		108		1.050	2.880
109		110		2.780	7.620
110		103		3.910	18.130
110		109		2.780	7.620
110		111		2.200	7.550
110		112		2.470	6.400
111		110		2.200	7.550
112		110		2.470	6.400
113		17		0.910	3.010
113		32		6.150	20.300
114		32		1.350	6.120
114		115		0.230	1.040
115		27		1.640	7.410
115		114		0.230	1.040
116		68		0.030	0.400
117		12		3.290	14.000
118		75		1.450	4.810
118		76		1.640	5.440

TABELA 21. - Dados de barras (Sistema IEEE 118 Barras).

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
1		0.956	-19.11	61.20	0.00	0.0	0.0
2		0.972	-18.56	24.00	0.00	0.0	0.0
3		0.968	-18.21	46.80	0.00	0.0	0.0
4		0.998	-14.47	36.00	0.00	-10.80	20.2
5		0.999	-13.99	0.0	0.0	0.0	0.0
6		0.984	-16.70	62.40	0.00	0.0	0.0
7		0.986	-17.17	22.80	0.00	0.0	0.0
8		1.003	-8.89	0.0	0.0	-28.00	0.0
9		1.003	-8.89	0.0	0.0	-28.00	0.0
10		1.050	6.07	0.0	0.0	720.00	0.0
11		0.984	-17.05	84.00	0.00	0.0	0.0
12		0.990	-17.58	56.40	0.00	102.00	110.1
13		0.966	-18.42	40.80	0.00	0.0	0.0
14		0.982	-18.28	16.80	0.00	0.0	0.0
15		0.963	-18.53	108.00	0.00	0.0	0.0
16		0.981	-17.86	30.00	0.00	0.0	0.0
17		0.988	-15.98	13.20	0.00	0.0	0.0
18		0.959	-18.14	72.00	0.00	0.0	0.0
19		0.956	-18.71	54.00	0.00	0.0	0.0
20		0.954	-17.85	21.60	0.00	0.0	0.0
21		0.957	-16.27	16.80	0.00	0.0	0.0
22		0.971	-13.74	12.00	0.00	0.0	0.0
23		1.006	-8.89	8.40	0.00	0.0	0.0
24		1.004	-9.13	0.0	0.0	-13.00	0.0
25		1.050	-1.87	0.0	0.0	88.00	42.0
26		1.015	-0.06	0.0	0.0	376.00	0.0
27		0.968	-14.44	74.40	0.00	-10.00	80000.0
28		0.962	-16.17	20.40	0.00	0.0	0.0
29		0.963	-17.17	28.80	0.00	0.0	0.0
30		0.980	-10.94	0.0	0.0	0.0	0.0
31		0.967	-17.06	51.60	0.00	8.40	32.9
32		0.967	-15.05	70.80	0.00	0.0	0.0

TABELA 21. - Continuação.

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
33		0.967	-19.18	27.60	0.00	0.0	0.0
34		0.985	-18.56	70.80	0.00	0.0	0.0
35		0.980	-18.99	39.60	0.00	0.0	0.0
36		0.979	-18.99	37.20	0.00	0.0	0.0
37		0.990	-18.09	0.0	0.0	0.0	0.0
38		0.961	-12.92	0.0	0.0	0.0	0.0
39		0.970	-21.47	32.40	0.00	0.0	0.0
40		0.970	-22.55	24.00	0.00	-55.00	20000.0
41		0.967	-22.99	44.40	0.00	0.0	0.0
42		0.985	-21.38	44.40	0.00	-70.00	80000.0
43		0.979	-18.61	21.60	0.00	0.0	0.0
44		0.986	-16.12	19.20	0.00	0.0	0.0
45		0.989	-14.30	63.60	0.00	0.0	0.0
46		1.009	-11.53	33.60	0.00	19.00	0.0
47		1.018	-9.25	40.80	0.0	0.0	0.0
48		1.021	-10.03	24.00	0.00	0.0	0.0
49		1.025	-9.02	104.40	0.00	244.00	0.0
50		1.001	-11.05	20.40	0.00	0.0	0.0
51		0.966	-13.65	20.40	0.00	0.0	0.0
52		0.956	-14.61	21.60	0.00	0.0	0.0
53		0.944	-15.58	27.60	0.00	0.0	0.0
54		0.953	-14.65	135.60	0.00	48.00	0.0
55		0.950	-14.94	75.60	0.00	0.0	0.0
56		0.952	-14.76	100.80	0.00	0.0	0.0
57		0.969	-13.56	14.40	0.00	0.0	0.0
58		0.958	-14.42	14.40	0.00	0.0	0.0
59		0.985	-10.61	332.40	0.00	186.00	0.0
60		0.993	-6.82	93.60	0.00	0.0	0.0
61		0.995	-5.93	0.0	0.0	192.00	0.0
62		0.998	-6.55	92.40	0.00	0.0	0.0
63		0.969	-7.23	0.0	0.0	0.0	0.0
64		0.984	-5.46	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA 21. - Continuação.

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
65		1.005	-2.33	0.0	0.0	469.00	0.0
66		1.050	-2.49	46.80	0.00	470.00	0.0
67		1.020	-5.13	33.60	0.00	0.0	0.0
68		0.999	-2.44	0.0	0.0	0.0	0.0
69		1.035	0.0	0.0	0.0	517.38	-63.5
70		0.981	-7.37	79.20	0.00	0.0	0.0
71		0.984	-7.79	0.0	0.0	0.0	0.0
72		0.995	-9.15	0.0	0.0	-12.00	0.0
73		0.984	-7.95	0.0	0.0	-6.00	0.0
74		0.958	-8.38	81.60	0.00	0.0	0.0
75		0.966	-7.09	56.40	0.00	0.0	0.0
76		0.937	-8.19	81.60	0.00	0.0	0.0
77		1.004	-3.29	73.20	0.00	0.0	0.0
78		1.001	-3.60	85.20	0.00	0.0	0.0
79		1.008	-3.31	46.80	0.00	0.0	0.0
80		1.040	-1.10	156.00	0.00	528.00	0.0
81		0.994	-1.91	0.0	0.0	0.0	0.0
82		0.987	-2.88	64.80	0.00	0.0	0.0
83		0.982	-1.74	24.00	0.00	0.0	0.0
84		0.976	0.72	13.20	0.00	0.0	0.0
85		0.981	2.24	28.80	0.00	0.0	0.0
86		0.968	0.80	25.20	0.00	0.0	0.0
87		0.972	0.76	0.0	0.0	0.0	0.0
88		0.986	5.40	57.60	0.00	0.0	0.0
89		1.005	9.47	0.0	0.0	782.00	40000.0
90		0.985	3.09	93.60	0.00	-102.00	0.0
91		0.989	2.98	0.0	0.0	-10.00	0.0
92		0.995	3.62	78.00	0.00	0.0	0.0
93		0.988	0.65	14.40	0.00	0.0	0.0
94		0.991	-1.48	36.00	0.00	0.0	0.0
95		0.981	-2.44	50.40	0.00	0.0	0.0
96		0.992	-2.60	45.60	0.00	0.0	0.0

TABELA 21. - Continuação.

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
97		1.011	-2.20	18.00	0.00	0.0	0.0
98		1.024	-2.67	40.80	0.00	0.0	0.0
99		1.020	-3.17	0.0	0.0	-42.00	0.0
100		1.017	-2.08	44.40	0.00	302.00	0.0
101		0.994	-0.53	26.40	0.00	0.0	0.0
102		0.993	2.13	6.00	0.00	0.0	0.0
103		0.985	-5.46	27.60	0.00	40.00	0.0
104		0.960	-8.35	45.60	0.00	0.0	0.0
105		0.956	-9.51	37.20	0.00	0.0	0.0
106		0.952	-9.76	51.60	0.00	0.0	0.0
107		0.936	-12.53	33.60	0.00	-22.00	0.0
108		0.958	-10.75	2.40	0.00	0.0	0.0
109		0.959	-11.22	9.60	0.00	0.0	0.0
110		0.966	-12.10	46.80	0.00	0.0	0.0
111		0.975	-10.46	0.0	0.0	36.00	0.0
112		0.975	-15.38	30.00	0.00	-51.00	60000.0
113		0.985	-15.97	0.0	0.0	-6.00	0.0
114		0.963	-15.36	9.60	0.00	0.0	0.0
115		0.962	-15.36	26.40	0.00	0.0	0.0
116		0.998	-2.86	0.0	0.0	-184.00	0.0
117		0.974	-19.13	24.00	0.00	0.0	0.0
118		0.946	-8.07	39.60	0.00	0.0	0.0

FIGURA 22. - Dados das máquinas (Sistema IEEE 118 Barras).

No. MÁQUINA	REATÂNCIA X'd (%)	CONST. INÉRCIA H (s)
4	8,75	8,00
10	6,36	22,00
12	17,50	8,00
25	10,00	14,00
26	5,38	26,00
27	8,75	8,00
31	8,75	8,00
40	8,75	8,00
42	8,75	8,00
49	11,67	12,00
59	14,00	10,00
61	11,67	12,00
65	7,00	20,00
66	7,00	20,00
69	4,67	30,00
80	5,00	28,00
89	4,38	32,00
90	8,75	8,00
100	8,75	16,00
112	4,67	15,00