

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

REALOCAÇÃO DE GERAÇÃO E ALÍVIO DE CARGA PARA ELIMINAÇÃO DE  
SOBRECARGAS CONSIDERANDO A ESTABILIDADE TRANSITÓRIA E  
PROGRAMAÇÃO LINEAR

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

Carlos Roberto Minussi

Florianópolis, Março-1981

REALOCAÇÃO DE GERAÇÃO E ALÍVIO DE CARGA PARA ELIMINAÇÃO DE SOBRECARGAS CONSIDERANDO A ESTABILIDADE TRANSITÓRIA E PROGRAMAÇÃO LINEAR

Carlos Roberto Minussi

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA. ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.  
Orientador

Prof. Luiz Jaime Branco Machado, D.Ing.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

Eng.º Luiz Gastão Castro Souza, M.Sc.

Prof. Hamilton Medeiros Silveira, D.Et.

Prof. Sahjendra Narain Singh, Ph.D.

À minha esposa Maria Marli  
sogros e cunhados

Aos meus Pais (in memorium) e irmão

## A G R A D E C I M E N T O S

Agradeço ao amigo Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca pela orientação segura, pelas sugestões e pela dedicação no sentido de levar este trabalho à forma final, mesmo sem a compensação material.

Sou grato também aos professores, colegas e funcionários do Centro Tecnológico, ao colega Carlos Noboru Sasano, principalmente ao colega Laurence Duarte Colvara pelas discussões e sugestões valiosas e ao Prof. Luiz Jairo Branco Machado pela sua colaboração.

Meu carinho à Maria Marli, minha esposa, pela confiança e segurança transmitidas durante a execução deste trabalho.

Agradeço ao apoio financeiro do CNEN que tornou possível a realização deste trabalho

Sou grato à Nazide e Iara pela datilografia.

## S U M Á R I O

RESUMO .....	1
ABSTRACT .....	2
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	3
CAPÍTULO 2 - ESTUDOS DA ESTABILIDADE EM SISTEMA DE POTÊNCIA	6
2.1 - Introdução .....	6
2.2 - Análise da estabilidade .....	7
2.3 - Modelo Matemático do Sistema de Potência .....	8
2.4 - Estabilidade do Estado de Equilíbrio dos Sistemas de Potência .....	11
2.5 - Domínio de Estabilidade .....	12
2.6 - Solução aproximada do Domínio de Estabilidade .....	22
2.7 - Algoritmo de Determinação do Domínio de Estabilidade ..	25
2.8 - Análise da Estabilidade em Tempo Real .....	28
2.9 - Algoritmo de Análise da Estabilidade Transitória em Tempo Real .....	29
2.10 - Orientação de busca do Domínio de Estabilidade através das Faces .....	32
2.11 - Conclusão .....	38
CAPÍTULO 3 - MELHORIA DA SEGURANÇA .....	39
3.1 - Introdução .....	39
3.2 - Desenvolvimento da Restrição da Estabilidade Transitó ria .....	39

3.3 - Determinação da variação da Tangência em função da Mu dança do Equilíbrio .....	50
3.4 - Algoritmo de Determinação dos Parâmetros da Restrição da Estabilidade Transitória .....	53
3.5 - Conclusão .....	53

CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR EM SEGURANÇA  
DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA ..... 56

4.1 - Introdução .....	56
4.2 - Formulação do Problema .....	56
4.3 - Restrição de Estabilidade Transitória .....	58
4.4 - Restrição de Transmissão .....	60
4.5 - Restrição de Potência das Máquinas e de cargas .....	61
4.6 - Restrição do Balanço de Potência .....	62
4.7 - Construção da Função Objetivo .....	63
4.8 - Método de Solução .....	67
4.9 - Conclusão .....	68

CAPÍTULO 5 - EXEMPLOS ..... 70

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES ..... 81

BIBLIOGRAFIA ..... 84

## RESUMO

Propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de um algoritmo alternativo capaz de solucionar, em tempo hábil, o problema de sobrecargas com respeito à estabilidade transitória dos sistemas de potência, de maneira que permita sua utilização em tempo real, mudando-se o ponto de equilíbrio do sistema através da realocação de geração e alívio de carga. Isto é feito criando-se uma restrição que define um estado desejado de segurança do sistema, utilizando um modelo linearizado, o qual é obtido a partir da energia potencial calculada no instante da retirada do defeito e da energia potencial do domínio de estabilidade. A solução deste problema é determinada utilizando programação linear.

O problema de otimização é formulado e resolvido minimizando o desvio em relação ao estado nominal de geração e minimizando o corte de carga, respeitando as restrições de segurança do sistema.

Os estudos da estabilidade em regime transitório são obtidos com a utilização de domínios de estabilidade dados pelo segundo método de Liapunov e determinados pelo método das tangências ([19,23]).

É introduzido um critério de orientação de busca do domínio de estabilidade com o objetivo de diminuir o tempo de processamento. São apresentados diversos exemplos que ilustram os resultados obtidos.

## A B S T R A C T

In this work is proposed an alternative algorithm which is able to solve, on time, the overloads problem about the transient stability of power systems, in such way that it permits its utilization on-line, changing the equilibrium point of the system through the generation reallocation and load shedding. This is made developing a constraint that defines a desired state of system, using a linear model, which is obtained from the potential energy calculated in the time when the fault is eliminated and the stability domain potential energy. This problem solution is determined using linear programming.

The optimization problem is formulated and solved minimizing the deviation from the nominal generation state and minimizing the load alleviate, subject to security constraint of the systems.

The transient stability studies are obtained using stability domains given by Liapunov's methods and determined by tangence's methods ([19, 23]).

It is introduced a criterion of search orientation of the stability domain to reduced the computation time. Many examples are presented to illustrate the obtained results.

## CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

É necessário que se projete e opere um sistema elétrico de potência com grande confiabilidade de atendimento aos consumidores mesmo sob certas condições de defeito. Assim, para um sistema em operação normal, quando submetido a uma perturbação provocada por um determinado defeito, é preciso saber se o estado do sistema atingirá o equilíbrio estável relativo à situação pós-defeito, se este existir, para que se possa analisar sua estabilidade.

Os métodos mais usados para a análise da estabilidade são os métodos indiretos ou numéricos ([1, 2, 6 a 9]). A partir do modelo do sistema, resolve-se numericamente as equações diferenciais durante e após o defeito. Uma análise posterior dos resultados dados em forma de curvas por um especialista, faz-se necessária. Isto torna este método proibitivo para utilização em tempo real.

Neste sentido o segundo método de Liapunov ([10 a 25]) tem-se mostrado atrativo aos pesquisadores. Este método dá informação qualitativa da estabilidade do tipo "é estável" ou "não se afirma" e consiste em se construir uma função dita de Liapunov, referente ao equilíbrio pós-defeito, com o objetivo de descrever um determinado domínio de estabilidade e também para verificar se o estado imediatamente após a retirada do defeito, se encontra ou não no seu interior.

Até agora pouco se fez no sentido de melhoraria da segurança definida a partir de contingências e considerações sobre a estabilidade transitória dos sistemas de potência ([22]), principalmente na operação. Quando se estiver diante de um problema desta natureza, é preciso tomar medidas rápidas para resolvê-lo.

O segundo método de Liapunov, pela sua própria característica, permite que se crie alternativas adequadas para se eliminar o problema de sobrecargas relativa à estabilidade transitória ([22]). Na operação tem-se, por exemplo, como medida corretiva a mudança no equilíbrio obtida a partir da ação de controle do sistema, de maneira a se expandir o domínio de estabilidade, bem como alterar o estado após a retirada do defeito, até que se encontre um resultado satisfatório.

O objetivo deste trabalho consiste em propor um algoritmo capaz de resolver o problema de sobrecargas. Considerando-se a estabilidade transitória, através de programação linear, de forma que se minimize o desvio em relação ao estado nominal de geração, e o corte de carga, se necessário. Este problema é resolvido sujeito às restrições tais como: balanço de potência, limitações físicas das máquinas, carregamento nas linhas de transmissão é também de estabilidade transitória, esta com o propósito de se eliminar as sobrecargas relativa à estabilidade transitória, que será desenvolvida neste trabalho.

Através de exemplo mostra-se que este algoritmo pode ser utilizado na operação dos sistemas de potência com respostas eficientes, indicando medidas a adotar para se evitar problemas de sobrecargas, devido a alguma contingência imposta ao sistema.

Os estudos deste trabalho se desenvolverão de forma que no capítulo 2 seja abordado a análise da estabilidade transitória, onde será descrito o modelo matemático do sistema, envolvendo também os estudos da estabilidade pelo segundo método de Liapunov e determinação de domínios de estabilidade na forma exata e aproximada, obtidos através do método das tangências ([19, 23]). Segue a apresentação de um algoritmo de análise da estabilidade em tempo real.

Paralelamente será introduzido uma heurística para orientação de busca do domínio de estabilidade com o propósito de reduzir o tempo de processamento.

No capítulo 3 será desenvolvido um procedimento para eliminação de sobrecargas apontadas pela análise da estabilidade sob contingências. Isto será proposto através do desenvolvimento de uma restrição que define um estado desejado de segurança do sistema. Será mostrado que existe uma infinidade de soluções para o problema e será proposto que esta seja encontrada utilizando programação linear, minimizando algum critério. Este problema será resolvido no capítulo 4 de forma a minimizar o desvio em relação ao estado nominal de geração e o alívio de carga. O critério para minimização será estabelecido considerando os custos de geração e os custos de corte de carga.

No capítulo 5 serão elaborados alguns exemplos de utilização deste algoritmo para eliminação de sobrecargas divididos em 4 exemplos.

Por fim, seguirá no capítulo 6, a conclusão deste trabalho.

## CAPÍTULO II

### ESTUDOS DA ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

#### 2.1 - Introdução

Os estudos da estabilidade transitória dão informação sobre a capacidade de um sistema de potência de perder ou não o sincronismo devido a perturbações introduzidas no sistema. É de grande importância o conhecimento do grau de estabilidade de um sistema de energia elétrica no planejamento e principalmente na operação. Para isto, é necessário determinar se o sistema é estável ou não no final de uma perturbação passageira.

A análise do comportamento da estabilidade em regime transitório é obtida por métodos indiretos e diretos. Os métodos indiretos são baseados na integração numérica das equações diferenciais que regem o comportamento dinâmico do sistema durante e após a perturbação.

No caso dos métodos diretos a questão da estabilidade pode ser determinada sem o uso explícito das soluções das equações diferenciais.

Neste capítulo será estudado um procedimento de análise da estabilidade transitória utilizando o método direto de Liapunov.

## 2.2 - Análise da estabilidade

Sabe-se que os métodos de análise de estabilidade através da solução numérica das equações diferenciais, embora sejam bastante versáteis e não apresentam restrição quanto à sofisticação do modelo empregado, apresentam o inconveniente de exigirem a análise das soluções das equações diferenciais em cada caso estudado. Além disso, quando o modelo do sistema é mais elaborado, pode-se consumir muito tempo computacional na simulação. Em certos casos é necessário a repetição da simulação para a conclusão da análise.

Estes fatos permitem que os métodos diretos, principalmente o segundo método de Liapunov tenham grande aplicabilidade nos sistemas de energia elétrica. Neste método a estabilidade é obtida sem o uso explícito das soluções das equações diferenciais e permite em geral a determinação de um domínio de estabilidade, isto é, um conjunto de todas condições iniciais em torno do ponto de equilíbrio estável, a partir das quais o sistema alcançará assintoticamente este equilíbrio e a contar do instante em que cessa a perturbação provocada pelo defeito. Para se determinar a estabilidade do sistema basta comparar o valor da função de Liapunov avaliada para o estado no instante da retirada do defeito com o valor da função que define o domínio de estabilidade.

Neste trabalho a determinação deste domínio de estabilidade é obtido através de um problema de otimização, cujo desenvolvimento foi feito nas referências ([19,21,23]).

### 2.3 - Modelo matemático do sistema de potência

Com o objetivo de se obter o modelo matemático para um sistema de potência, serão introduzidas as seguintes suposições ([1,6,14,16,19,23]), como segue:

A máquina síncrona será representada por uma fonte de tensão constante atrás de uma reatância transitória de eixo direto. Isto implica que o enlace de fluxo é suposto constante durante o transitório. Não serão considerados os efeitos dos reguladores de tensão e o efeito da reação da armadura sobre o fluxo principal.

A potência mecânica será tomada constante durante o transitório, isto porque os reguladores de velocidade possuem constantes de tempo grandes comparadas com a duração do transitório.

A constante de inércia das máquinas será considerada como constante, desde que os escorregamentos são pequenos.

As potências de amortecimento serão consideradas proporcionais às velocidades de escorregamento e às diferenças de velocidade de escorregamento, na qual a primeira parcela é devida à perdas mecânicas e variações da carga com o escorregamento, enquanto a outra é devida ao amortecimento assíncrono.

As máquinas síncronas serão consideradas como sendo de rotor liso.

As cargas poderão ser representadas por uma admitância constante e desprezam-se as condutâncias de transferência. Reduz-se o sistema às suas barras internas de geração.

A equação diferencial que descreve o movimento do

rotor para um sistema de n-máquinas interligadas com as suposições feitas, como em ([19,23,24,25]) é:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + a_i \frac{d\delta_i}{dt} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} \left( \frac{d\delta_i}{dt} - \frac{d\delta_j}{dt} \right) + P_{e_i} - P_{m_i} = 0 \quad (2.3.1)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

onde:

- n - Número de máquinas,
- t - Tempo (segundos),
- $\delta_i$  - Ângulo em graus elétricos do rotor da i-ésima máquina medido em relação a um eixo girando a uma velocidade síncrona de referência,
- $M_i$  - Constante de enérgia da i-ésima máquina (p.u.Seg<sup>2</sup>),
- $a_i$  - Coeficiente de amortecimento da i-ésima máquina (pu.sec),
- $b_{ij}$  - Coeficiente de amortecimento assíncrono, em geral  $b_{ij} \neq b_{ji}$  (p.u. seg),
- $P_{m_i}$  - Potência mecânica de entrada à i-ésima máquina (p.u),
- $P_{e_i}$  - Potência elétrica entregue pela i-ésima máquina (p.u), é dada por:

$$P_{e_i} = E_i^2 \cdot G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |E_i \cdot E_j| \cdot B_{ij} \cdot \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \quad (2.3.2)$$

onde:

- $E_i$  - Tensão na barra interna da i-ésima máquina (p.u),
- $G_{ii}$  - Carga equivalente na i-ésima barra de geração (p.u),
- $B_{ij}$  - Suceptância de transferência entre a i-ésima e a j-ési

ma barras internas de geração (p.u).

por conveniência pode-se definir as seguintes variáveis:

$$|E_i \cdot E_j| B_{ij} = F_{ij}, \quad (2.3.3)$$

$$P_{mi} - G_{ii} E_i^2 = P_i, \quad (2.3.4)$$

onde:

$F_{ij}$  - Coeficiente de sincronização,

$P_i$  - Injeção de potência na barra  $i$ .

Definindo-se  $\delta_i$  e  $\dot{\delta}_i$  para  $i = 1, 2, \dots, n$ , como variáveis de estado, isto é,

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \dot{\delta}_i = \omega_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.3.5)$$

$\omega_i$  é a velocidade da  $i$ -ésima máquina relativa ao sistema de referência, desta forma pode-se escrever (2.3.2) na seguinte forma ([19, 23, 24]):

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

$$\dot{\omega}_i = M_i^{-1} \cdot \left[ -a_i \omega_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (\omega_i - \omega_j) + P_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n F_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \right] \quad (2.3.6)$$

para  $i = 1, 2, \dots, n$

Este modelo tem um espaço de estados de dimensão  $2n$ . Nos casos mais gerais os sistemas de potência possuem amortecimentos não uniforme ([19,25]), assim, pode-se escrever (2.3.6) com  $(2n-1)$  variáveis independentes, tomando um dos ângulos de máquina como referência. Por conveniência toma-se  $\delta_n$  com este propósito. Então pode-se escrever ([19,23,24]):

$$\alpha_i = \delta_i - \delta_n \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.3.7)$$

Substituindo (2.3.7) em (2.3.6), tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_i &= \omega_i - \omega_n && \text{para } i=1, 2, \dots, n-1 \\ \dot{\omega}_i &= M_i^{-1} \cdot \left[ -a_i \omega_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (\omega_i - \omega_j) + P_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} \text{sen}(\alpha_i - \alpha_j) - F_{in} \text{sen}(\alpha_i) \right] \\ &&& \text{para } i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

#### 2.4 - Estabilidade do estado de equilíbrio dos sistemas de potência

O equilíbrio dos sistemas de potência pode ser obtido de (2.3.8) com  $\dot{\omega} = 0$  e  $\dot{\alpha} = 0$ . Tomando-se:

$$f_i(P, F, \alpha) = P_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} \text{sen}(\alpha_i - \alpha_j) - F_{in} \text{sen} \alpha_i \quad (2.4.1)$$

O equilíbrio é então dado por:

$$\omega = 0 \quad (2.4.2.a)$$

$$f(P, F, \alpha) = 0 \quad (2.4.2.b)$$

As soluções de equilíbrio de (2.4.2.b) são da forma  $\begin{bmatrix} 0 \\ \alpha^e \end{bmatrix}$ ,  $0 \in \mathbb{R}^n$  e  $\alpha^e \in \mathbb{R}^{n-1}$ .  $\alpha^e$  é o  $\alpha$  de equilíbrio.

Nas referências ([19,26]) utiliza-se uma determinada região, denominada região principal, que é definida a partir do determinante do jacobiano de  $f(P, F, \alpha)$ . Demonstra-se que esta região contém o politopo  $L$ , assim definido:

$$L = \{ \alpha \mid |\alpha_i| \leq \frac{\pi}{2}, |\alpha_i - \alpha_j| \leq \frac{\pi}{2}, i, j = 1, 2, \dots, n-1 \} \quad (2.4.3)$$

Em ([19]) mostra-se que se (2.4.2.b) possui solução, existe uma única solução na região principal e que  $\begin{bmatrix} 0 \\ \alpha^e \end{bmatrix}$  com  $\alpha^e$  na região principal, implica que este ponto de equilíbrio é assintoticamente estável. Então se  $\alpha^e \in L$  tem-se uma condição suficiente para a estabilidade do equilíbrio em  $L$ , fácil de ser verificada, tendo em vista que o jacobiano de  $f(P, F, \alpha)$  é a hessiana da energia potencial e definida positiva em  $L$ .

## 2.5 - Domínio de estabilidade

Em função do comportamento não linear dos sistemas de potência, para se determinar a estabilidade transitória através do segundo método de Liapunov, analisando-se a resposta livre do

sistema, é preciso de antemão saber se o ponto de equilíbrio de (2.3.8) é assintoticamente estável como visto na seção (2.4). Além disto, é necessário saber onde se encontram os estados do sistema no instante da retirada do defeito. Por isso se o equilíbrio pós defeito é assintoticamente estável, necessita-se determinar um domínio de estabilidade, que é um conjunto de condições iniciais que definem trajetórias do sistema que alcançam o equilíbrio estável pós-defeito. Por fim, a partir dos estados no instante da retirada do defeito, verificar se estes se encontram no interior do domínio, para se determinar a estabilidade.

O segundo método de Liapunov consiste nos seguintes passos:

- 1 - Construir uma função dita de Liapunov.
- 2 - Determinar uma região ou domínio de estabilidade.
- 3 - Verificar se os estados do sistema imediatamente após a retirada do defeito se encontram no interior da região de terminada.

Uma função de Liapunov para sistemas autônomos satisfaz as seguintes propriedades ([19,20,23,26,27]):

$$V(X) > 0 ; X \neq 0 \quad (2.5.1)$$

$$V(X) = 0 ; X = 0 \quad (2.5.2)$$

$$\dot{V}(X) < 0 ; X \neq 0 \quad (2.5.3)$$

$$\dot{V}(X) = 0 ; X = 0 \quad (2.5.4)$$

onde:  $V$  - Função de Liapunov

$X$  - vetor dos estados do sistema,

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \cdot \frac{dx_i}{dt}, \text{ derivada de V.} \quad (2.5.5)$$

Seja  $\begin{bmatrix} 0 \\ \alpha^e \end{bmatrix}$ , equilíbrio assintoticamente estável de (2.3.8), pode-se transladá-lo para a origem através da mudança de variáveis;

$$z_i = \alpha_i - \alpha_i^e \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.5.6)$$

Desta forma (2.3.8) pode ser escrito, usando as definições (2.4.1) e (2.5.6)

$$\dot{z}_i = \omega_i - \omega_n$$

$$\dot{\omega}_i = M_i^{-1} \left[ -a_i \omega_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (\omega_i - \omega_j) + f_i(P, F, Z + \alpha^e) \right] \quad (2.5.7)$$

Implicando no equilíbrio de (2.3.8) passa a ser origem de (2.5.7).

Uma função de Liapunov para o sistema (2.5.7), ([19, 23, 28]) é:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} [-\cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - z_{ij} \text{sen} \alpha_{ij}^e] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} [-\cos(z_i + \alpha_i^e) + \cos \alpha_i^e - z_i \text{sen} \alpha_i^e] \quad (2.5.8)$$

onde  $z_{ij} = z_i - z_j$ , e  $\alpha_{ij}^e = \alpha_i^e - \alpha_j^e$ . Observa-se que os pontos ex-

tremos de (2.5.8) coincidem com os pontos de equilíbrios do sistema. É mostrado em ([19]) que a derivada de  $V$  é semi-definida negativa. Através do teorema de LaSalle ([19,21]), pode-se demonstrar que  $V$  é válida como função de Liapunov para a estabilidade assintótica da origem de (2.5.7) na região:

$$G = \left\{ \begin{bmatrix} \omega \\ Z \end{bmatrix} \mid Z \in L_2 \right\} \quad (2.5.9)$$

onde:

$$L_2 = \{ Z \mid (-\pi - 2\alpha_k^e) \leq z_k \leq (\pi - 2\alpha_k^e) \text{ e } (-\pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)) \leq z_{kp} \leq (\pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)) \} \quad k, p = 1, \dots, n-1, \quad k \neq p. \quad (2.5.10)$$

O conjunto  $L_2$  contém o conjunto  $L$  definido em (2.4.3) se  $\alpha^e \in L$ . Prova-se em ([19, 21]) que a função (2.5.8) é a função energia e que a função energia potencial de (2.5.7) pode ser escrita na forma:

$$E_p(P, F, Z) = V - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 \quad (2.5.11)$$

Onde  $\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2$  é a energia cinética de (2.5.7).

A função  $E_p$  possui a propriedade de ser radialmente crescente em  $L_2$ . Assim, no conjunto  $G$ , não existe outro ponto de equilíbrio de (2.5.7), além do equilíbrio assintoticamente estável  $\begin{bmatrix} 0 \\ \alpha^e \end{bmatrix}$ .

A determinação do domínio de estabilidade pode ser feita através da solução do problema de otimização ([19,23]):

$$\begin{aligned} & \min_z E_p(P, F, Z) \\ & \text{S.a.}^\dagger Z \in \delta L_2 \end{aligned} \quad (2.5.12)$$

Onde  $\delta L_2$  é a fronteira de  $L_2$ . Assim a solução de (2.5.12) é encontrar o ponto de tangência da superfície de nível de  $E_p$  com a fronteira de  $L_2$ , de tal modo que o conjunto de nível obtido esteja inteiramente contido no conjunto  $L_2$  e intersepta a fronteira  $\delta L_2$ . Desta forma, o domínio de estabilidade assintótica para a origem do sistema (2.5.7) é:

$$D = \left\{ \begin{bmatrix} \omega \\ Z \end{bmatrix} \mid V(\omega, Z) \leq V(0, Z^*) = E_p(F, P, Z^*) \right\} \quad (2.5.13)$$

Onde  $Z^*$  é a tangência da superfície de nível com a fronteira de  $L_2$ .

O problema (2.5.12) pode ser colocado de outra forma, ([23]).

$$\begin{aligned} & \min_k \{ \min_z E_p(Z) \} \\ & \text{S.a. } Z \in (W_k \cap L_2) \end{aligned} \quad (2.5.14)$$

Onde  $W_k$  é um hiperplano que contém o  $k$ -ésima face de  $L_2$  de dimensão máxima. As faces  $W_k$  do politopo  $L_2$  são do tipo:

$$z_k = z_k - (\pm\pi - 2\alpha_k^e) = 0 \quad (2.5.15)$$

<sup>†</sup> Sujeito a restrição

$$z_{kp} = z_k - z_p - \left( \frac{+}{-} \pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e) \right) = 0 \quad (2.5.16)$$

Mostra-se em ([19]) que a energia potencial  $E_p$  pode ser decomposta em  $m$  parcelas:

$$E_p = \sum_{k=1}^m g_k$$

$$g_k = F_{ij} [2\cos(\alpha_{ij}^e) - z_{ij} \operatorname{sen} \alpha_{ij}^e] \quad (2.5.17)$$

onde  $m$  é o número de faces do politopo  $L_2$ ,  $g_k$  é denominado limite inferior de  $E_p$  e depende de  $(z_k)$  ou  $(z_k - z_p)$ , na face correspondente.

Então o problema (2.5.14) pode ser decomposto em dois subproblemas ([23]), dependendo essencialmente do tipo das faces (2.5.15) ou (2.5.16) e consiste em encontrar o mínimo entre os mínimos destes subproblemas. Quando as faces forem do tipo (2.5.15) o subproblema fica ([23]).

$$\begin{aligned} & \text{Min } E_p(Z) \\ & Z \end{aligned} \quad (2.5.18)$$

$$\text{S.a. } z_k - \left[ \frac{+}{-} \pi - 2\alpha_k^e \right] = 0$$

$$Z \in L_2$$

Utilizando o multiplicador de Lagrange, tem-se:

$$\text{Min} \{ E_p(Z) + \lambda [z_k - \left( \frac{+}{-} \pi - 2\alpha_k^e \right)] \} \quad (2.5.19)$$

$$\text{S.a. } Z \in L_2$$

onde  $\lambda$  é o multiplicador de Lagrange.

Para as faces do tipo (2.5.16) o subproblema fica ([23]):

$$\begin{aligned} & \text{Min } E_p(Z) \\ & Z \\ & \text{S.a. } z_k - z_p - \left[ \frac{+}{-} \pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e) \right] = 0 \quad (2.5.20) \\ & Z \in L_2 \end{aligned}$$

Da mesma forma, utilizando o multiplicador de lagrange, o subproblema fica:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \{ E_p(Z) + \lambda [z_k - z_p - \left( \frac{+}{-} \pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e) \right)] \} \quad (2.5.21) \\ & \text{S.a } Z \in L_2 \end{aligned}$$

A determinação do ponto de tangência descrito acima será solucionada através do método iterativo de Newton - Raphson devido ao fato de que a função  $E_p$  possui comportamento quase quadrático e para este caso este método é bastante eficiente ([23]). A solução iterativa ([23,24]) é:

$$Z^{i+1} = Z^i - J^{-1}(Z^i) \cdot \nabla E(Z^i) \quad (2.5.22)$$

onde  $i$  é o passo de iteração,  $\nabla E(Z^i)$  é o valor do gradiente do lagrangiano calculado no ponto  $Z$  do passo  $i$  e  $J^{-1}(Z^i)$  é a inversa do Jacobiano calculado em  $Z^i$ . A  $n$ -ésima componente de  $Z$  em (2.5.22) corresponde a variável  $\lambda$ .

Então, no caso das faces serem do tipo (2.5.15), tem-se o subproblema (2.5.19), a energia potencial pode ser escrita a partir de (2.5.11):

$$E_p(Z) = \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} [-\cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - z_{ij} \cdot \text{sen} \alpha_{ij}^e] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} [-\cos(z_i + \alpha_i^e) + \cos \alpha_i^e - z_i \text{sen} \alpha_i^e] \quad (2.5.23)$$

Calculando-se o gradiente de  $E = E_p(Z) + \lambda Z_k$  ([23]), tem-se:

$$\nabla E_i = \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} [\text{sen}(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) - \text{sen} \alpha_{ij}^e] + F_{in} [\text{sen}(z_i + \alpha_i^e) - \text{sen} \alpha_i^e] \quad (2.5.24)$$

para  $i = 1, 2, \dots, n-1, i \neq k$

$$\nabla E_k = \sum_{j=1}^{n-1} F_{kj} [\text{sen}(z_{kj} + \alpha_{kj}^e) - \text{sen} \alpha_{kj}^e] + F_{in} [\text{sen}(z_k - \alpha_k^e) - \text{sen} \alpha_k^e] + \lambda \quad (2.5.25)$$

$$\nabla E_n = z_k - (\pi - 2\alpha_k^e) \quad (2.5.26)$$

onde:

$$\nabla E_i = \frac{\partial}{\partial z_i} (E_p(Z) + \lambda Z_k) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.5.27)$$

$$\nabla E_n = \frac{\partial}{\partial \lambda} (E_p(Z) + \lambda Z_k) \quad (2.5.28)$$

O jacobiano do gradiente (ou hessiano de  $E_p(Z) + \lambda Z_k$ )  
será:

$$J_{ij} = \begin{cases} \sum_{l=1}^{n-1} F_{il} \cos(z_{il} + \alpha_{il}^e) + F_{in} \cos(z_i + \alpha_i^e) & i=j \\ l \neq i & \\ -F_{ij} \cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) & i \neq j \end{cases} \quad (2.5.29)$$

para  $i, j=1, 2, \dots, n-1$

$$J_{n1} = J_{in} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq k \quad (2.5.30)$$

$$J_{kn} = J_{nk} = 1 \quad (2.5.31)$$

onde:

$$J_{ij} = \left[ \frac{\partial}{\partial z_j} (\nabla E_i) \right] \quad \text{para } i, j=1, 2, \dots, n-1 \quad (2.5.32)$$

$$J_{in} = J_{ni} = \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} (\nabla E_i) \right] \quad i=1, 2, \dots, n-1 \quad (2.5.33)$$

Assim:

$$\nabla E = [\nabla E_i] \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.5.34)$$

e

$$J = [J_{ij}] \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.5.35)$$

A condição necessária para o mínimo de (2.5.18) é:

$$\nabla E = 0 \quad (2.5.36)$$

Quando o mínimo ocorre em faces do tipo (2.5.16) a solução de (2.5.20) fica conforme (2.5.21). Calculando-se o gradiente de  $E = E_p(z) + \lambda z_{kp}$  ([23]):

$$\nabla E_i = \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} [\text{sen}(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) - \text{sen} \alpha_{ij}^e] + F_{in} [\text{sen}(z_i + \alpha_i^e) - \text{sen} \alpha_i^e] \quad (2.5.37)$$

para  $i=1,2,\dots,n-1$ ,  $i \neq k$ ,  $i \neq p$

$$\nabla E_k = \sum_{j=1}^{n-1} F_{kj} [\text{sen}(z_{kj} + \alpha_{kj}^e) - \text{sen} \alpha_{kj}^e] + F_{kn} [\text{sen}(z_k + \alpha_k^e) - \text{sen} \alpha_k^e] + \lambda \quad (2.5.38)$$

$$\nabla E_p = \sum_{j=1}^{n-1} F_{pj} [\text{sen}(z_{pj} + \alpha_{pj}^e) - \text{sen} \alpha_{pj}^e] + F_{pn} [\text{sen}(z_p + \alpha_p^e) - \text{sen} \alpha_p^e] - \lambda, \quad (2.5.39)$$

$$\nabla E_n = z_k - z_p - \left[ \frac{+}{-} \pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e) \right] \quad (2.5.40)$$

Calculando-se o jacobiano do gradiente:

$$J_{ij} = \begin{cases} \sum_{\ell=1}^{n-1} F_{i\ell} \cos(z_{i\ell} + \alpha_{i\ell}^e) + F_{in} \cos(z_i + \alpha_i^e) & i = j \\ -F_{ij} \cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) & i \neq j \end{cases} \quad (2.5.41)$$

para  $i, j=1,2,\dots,n-1$

$$J_{in} = J_{ni} = 0, \quad i=1,2,\dots,n, \quad i \neq k, \quad i \neq p \quad (2.5.42)$$

$$J_{kn} = J_{nk} = 1 \quad (2.5.43)$$

$$J_{pn} = J_{np} = -1 \quad (2.5.44)$$

## 2.6 - Solução aproximada do domínio de estabilidade

O comportamento do método de Newton, quando utilizados em problemas de otimização para funções quadráticas, possui convergência em uma iteração ([5]) e como a função energia potencial em questão possui comportamento semelhante a uma quadrática e além disto, mostrou-se em ([10]) que esta função varia muito pouco nas proximidades do ponto de equilíbrio instável, então, o uso da primeira aproximação do problema (2.5.22) fornece resultado com boa precisão.

Desta forma, a determinação do domínio de estabilidade através do método de Newton utilizando-se a primeira aproximação, além de oferecer um resultado satisfatório, resulta numa grande economia de tempo de processamento.

Utilizando-se por conveniência uma condição inicial zero tem-se uma solução do problema de (2.5.22) que pode ser escrito da seguinte forma:

$$Z = -J(0)^{-1} \cdot \nabla E(0) \quad (2.6.1)$$

onde:

Z é solução na tangência.

$J(0)^{-1}$  é a inversa do Jacobiano e  $\nabla E(0)$  é o gradiente calculados respectivamente na condição inicial nula.

Pode-se escrever (2.7.1) de outra forma:

$$J(0) \cdot Z = -\nabla E(0) \quad (2.6.2)$$

Através das simplificações introduzidas, utilizando (2.6.2) no caso de que as faces forem do tipo (2.5.15) pode-se escrever:

$$\begin{array}{c}
 J_{ij} = \begin{cases} \sum_{l=1}^{n-1} F_{il} \cos(\alpha_{il}^e) + F_{in} \cos(\alpha_i^e) & i=j \\ -F_{ij} \cos(\alpha_{ij}^e) & i \neq j \end{cases} \\
 \text{para } i, j = 1, 2, \dots, n-1
 \end{array}
 \left[ \begin{array}{c|c}
 \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_k \\ \vdots \\ z_{n-1} \\ \lambda \end{matrix}
 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \hline (-\pi - 2\alpha_k^e) \end{array} \right] \quad (2.6.3)$$

Analogamente quando as faces forem do tipo (2.5.16),

tem-se:

$$\begin{array}{c}
 J_{ij} = \begin{cases} \sum_{l=1}^{n-1} F_{il} \cos(\alpha_{il}^e) + F_{in} \cos(\alpha_i^e) & i=j \\ -F_{ij} \cos(\alpha_{ij}^e) & i \neq j \end{cases} \\
 \text{para } i, j = 1, 2, \dots, n-1
 \end{array}
 \left[ \begin{array}{c|c}
 \begin{matrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ -1 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} z_1 \\ \vdots \\ z_k \\ \vdots \\ z_p \\ \vdots \\ z_{n-1} \\ \lambda \end{matrix}
 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \hline [\pm\pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)] \end{array} \right]$$

$$(2.6.4)$$

Observa-se em (2.6.3) e (2.6.4) que apenas varia a última linha e coluna do jacobiano, enquanto que o restante é preservado durante a busca da tangência de mínima energia. Então, a solução do sistema linear (2.6.2) sugere que se utilize a decomposição LU ([5]), onde L e U são as matrizes triangular inferior e triangular superior respectivamente tal que:

$$J(0) = L.U \quad (2.6.5)$$

Substituindo (2.6.5) em (2.6.2), tem-se:

$$L.U.Z = -\nabla E(0) \quad (2.6.6)$$

Cuja solução é dada pelo seguinte sistema de equações:

$$L.X = -\nabla E(0) \quad (2.6.7)$$

$$e \quad U.Z = X \quad (2.6.8)$$

onde X é um vetor auxiliar.

O vetor  $\nabla E(0)$  possui todas as suas componentes nulas exceto a n-ésima. Assim a solução de (2.6.7) é o próprio  $[-\nabla E(0)]$ . Em outras palavras, a solução de (2.6.2) para Z é equivalente à solução de (2.6.8), ou seja:

$$U.Z = -\nabla E(0) \quad (2.6.9)$$

que pode ser facilmente resolvido pelo processo de substituição

inversa.

## 2.7 - Algoritmo de determinação de domínios de estabilidade

Apresenta-se a seguir o algoritmo para determinação de domínios de estabilidade baseado no método descrito antes.

Os passos do algoritmo da Figura (2.7.1) podem ser descrito como a seguir:

Passo 1 - Gerar todos os  $m$  limites inferiores correspondentes às faces (2.5.15) e (2.5.16).

Passo 2 - Calcular o jacobiano utilizando (2.5.29) de dimensão  $n-1$  com base nos dados da matriz de admitância reduzida e equilíbrio pós-defeito. Processar a decomposição LU.

Observa-se que mesmo utilizando-se apenas a matriz  $U$  para a solução do problema (2.6.2), precisa-se da matriz  $L$  como auxílio, devido a dependência da  $n$ -ésima coluna de  $U$  que será obtida no passo 5 em função da matriz  $L$ .

Passo 3 - Os limites inferiores dão estimativa do afastamento do ponto de equilíbrio com relação à face correspondente. Desta forma, indica onde ocorre a provável mínima energia. Assim, utiliza-se a ordenação dos limites inferiores, dando-se prioridade de busca da tangência em função da ordem crescente destes limites.

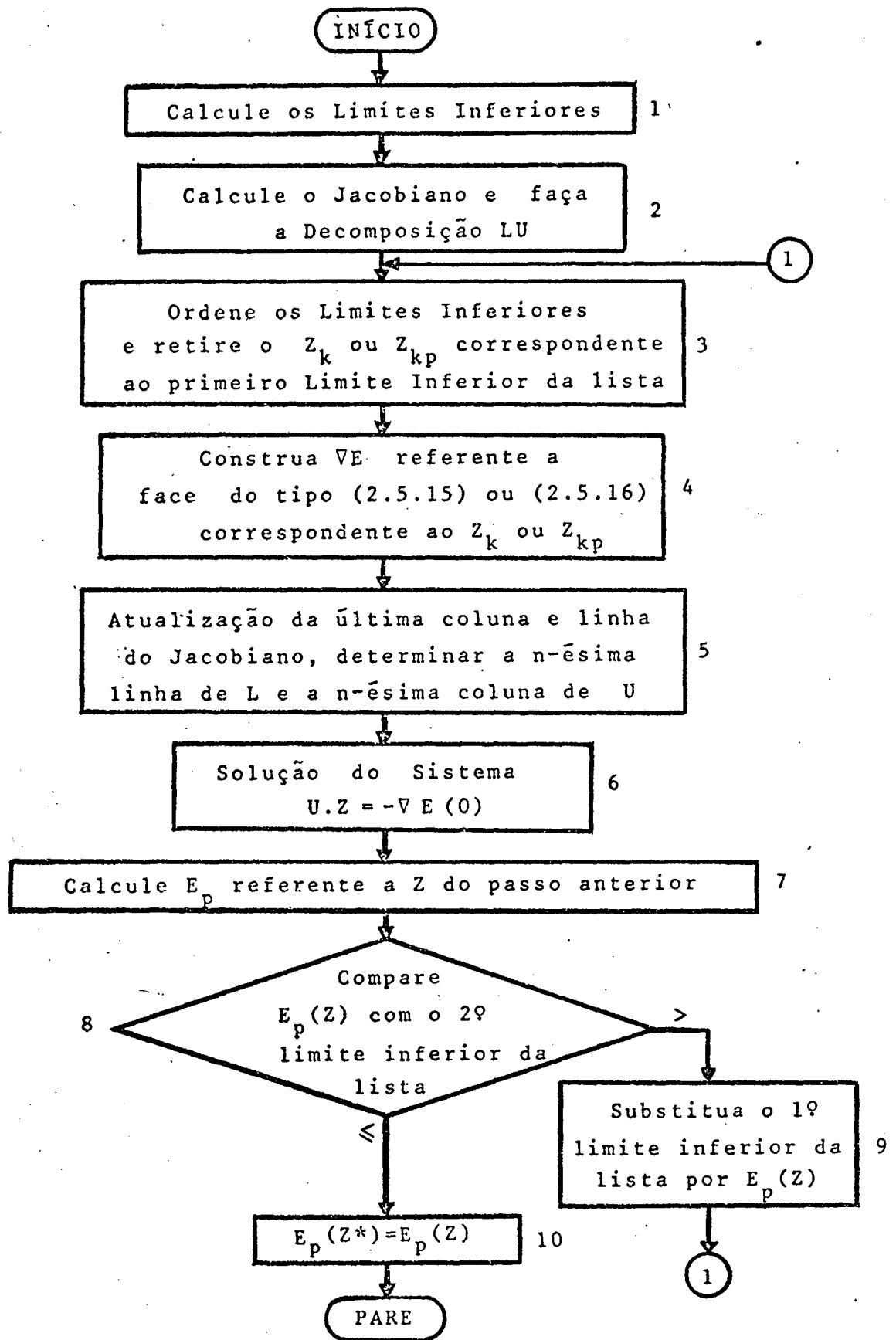


Figura 2.7.1 - Fluxograma do algoritmo de determinação de domínios de estabilidade

- Passo 4 - Uma vez selecionado o  $z_k$  ou  $(z_k - z_p)$  correspondente ao limite inferior, calcular a  $n$ -ésima componente de  $\nabla E$ , visto que as demais componentes são nulas, respectivamente utilizando (2.5.26) ou (2.5.40) conforme for caso, para  $z_k$  ou  $(z_k - z_p)$  iguais a zero.
- Passo 5 - Como já visto no processo de busca de tangências de mínima energia, a matriz jacobiana apenas muda a última linha e coluna a cada busca. Neste caso deve-se compor a  $n$ -ésima linha e coluna do jacobiano utilizando (2.5.30) e (2.5.31) ou (2.5.42), (2.5.43) e (2.5.44), conforme for o caso, conseqüentemente determinar a  $n$ -ésima linha de  $L$  e  $n$ -ésima coluna de  $U$ , em função da  $n$ -ésima linha e coluna do jacobiano e do resultado obtido no passo 2.
- Passo 6 - Solução do sistema (2.6.9) por substituição inversa, visto que a matriz  $U$  é triangular superior.
- Passo 7 - Calcular a energia potencial referente a solução do passo 6 utilizando (2.5.23).
- Passo 8 - Comparar a energia potencial obtido no passo anterior com o segundo valor da lista dos limites inferiores ordenados. Se menor pare, caso contrário prosiga.
- Passo 9 - Neste caso deve-se proceder a troca do primeiro limite inferior da ordenação pela energia potencial. Esta operação representa a substituição da estimativa da energia pela energia da tangência na face correspondente. Volte ao passo 3.

Passo 10 - Defina o domínio como sendo o conjunto:

$$D = \left\{ \begin{bmatrix} \omega \\ Z \end{bmatrix} \mid V(\omega, Z) \leq E_p(Z^*) \right\}$$

## 2.8 - Análise da estabilidade em tempo real

Os estudos até agora desenvolvidos permitem a análise do comportamento da estabilidade transitória na operação dos sistemas de potência sob contingências.

Deve-se, evidentemente, proceder à verificação se os estados do sistema no instante da retirada do defeito, pertencem ou não ao domínio de estabilidade referente ao equilíbrio pós-defeito.

As contingências de interesse neste estudo se restringem à retirada de linhas de operação. Assim sendo, pode-se definir índice de segurança ([24]) a partir da energia inicial do sistema e do domínio de estabilidade, como segue:

$$I_s = \frac{E_p(Z^*) - E_p(\alpha^0)}{E_p(Z^*)} \quad (2.8.1)$$

onde:

$I_s$  é o índice de segurança para uma determinada contingência,  $E_p(Z^*)$  o valor da energia potencial correspondente ao domínio de estabilidade e  $E_p(\alpha^0)$  a energia potencial calculada no ponto de operação no momento da retirada da linha, relativo ao equilíbrio pós-defeito.

Observa-se que ocorrem duas situações: a primeira onde  $0 \leq I_s \leq 1$ , o que indica que o sistema é estável e a segunda, quando  $I_s < 0$ , onde nada pode-se afirmar quanto à estabilidade. Isto segue do fato dos métodos de determinação de domínios de estabilidade serem conservativos e representa um fato indesejável.

### 2.9 - Algoritmo da análise da estabilidade transitória em tempo real

O procedimento para análise da estabilidade de um ponto de equilíbrio (2.5.7), pode ser descrito através do fluxograma da figura (2.9.1).

O procedimento apresentado da figura (2.9.1) pode ser descrito através dos passos seguintes:

Passo 1 - Efetuar estudos de fluxo de potência pré-defeito, com base nas tensões e potências de barras.

É conveniente obter diretamente do cálculo do fluxo de potência, as tensões dos geradores atrás da reatância síncrona. Para isso, deve-se introduzir na matriz de admitâncias de barra a admitância correspondente a reatância síncrona das máquinas.

Passo 2 - Determinação do equilíbrio pós-defeito utilizando o modelo de potência ativa e fixando os módulos de tensão obtidos do fluxo de potência relativo ao pré-defeito. Supondo-se a potência mecânica constante durante o transitório.

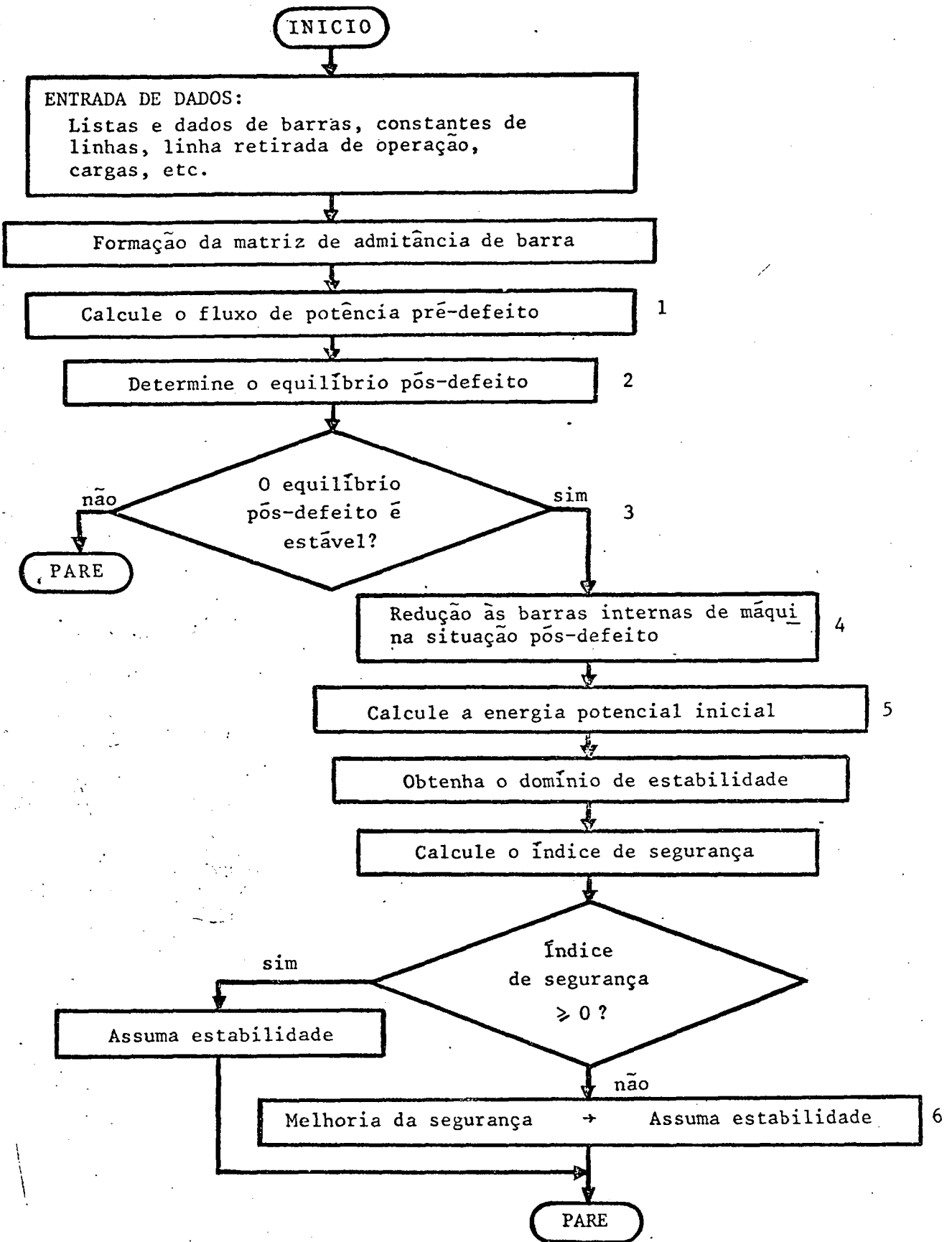


Figura 2.9.1 - Fluxograma do algoritmo para análise da estabilidade transitória e proposição da melhoria da segurança em tempo real.

Passo 3 - Verificar se o equilíbrio pós-defeito pertence ao conjunto L definido em (2.4.3). Caso negativo pare.

Passo 4 - Eliminar todas as barras, exceto as barras internas de geração e obter a matriz de admitância reduzida da rede. Esta redução pode ser obtida por operações matriciais, transformando todas as cargas em admitância "Shunt" assumindo assim que as barras possuem injeções nulas salvo as barras internas das máquinas. Então a matriz de admitâncias de barra pode ser particionada como mostrado a seguir ([3, 4]):

$$Y_{\text{barra}} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GG} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \quad (2.9.1)$$

Onde o subscrito G representa as barras de geração e L as barras restantes do sistema. Então a matriz reduzida é determinada por:

$$Y_{\text{reduzida}} = Y_{GG} - Y_{GL} \cdot Y_{LL}^{-1} \cdot Y_{LG} \quad (2.9.2)$$

Passo 5 - Determinar a energia potencial inicial do sistema utilizando (2.5.23), processando a seguinte mudança de variável  $z_{ij} = \alpha_{ij} - \alpha_{ij}^e$  para  $i, j=1, 2, \dots, n-1$ ;  $j \neq i$

Onde:

$\alpha_{ij}$  é o equilíbrio pré-defeito e  $\alpha_{ij}^e$  represen

ta o equilíbrio pós-defeito.

Passo 6 - Encontrar uma alternativa para eliminação da sobrecarga. Este procedimento será desenvolvido no capítulo a seguir.

#### 2.10 - Orientação de busca do domínio de estabilidade de através das faces

Foi apresentado antes o desenvolvimento do algoritmo de determinação de domínios de estabilidade dos sistemas de potência, pelo método das tangências. Este consiste em gerar os  $m$  limites inferiores de (2.5.17) e ordená-los em ordem crescente. A busca do domínio de estabilidade feita segundo esta orientação, permite que se o encontre com maior rapidez, pois o limite inferior dá uma estimativa da grandeza da energia potencial na tangência na respectiva face. Toma-se o primeiro limite inferior da lista e resolve-se com relação a este, o sistema de equações (2.6.9). A energia potencial encontrada é comparada com o segundo limite inferior da lista. Se for menor ou igual, a energia do domínio correspondente então ao primeiro limite inferior. Caso contrário, substitui-se este limite pela energia potencial calculada, reordena-se a lista de limites inferiores e repete-se este processo até encontrar o domínio de estabilidade.

Nos casos práticos constata-se que o domínio de estabilidade é encontrado após investigar entre 10% a 50% dos limites inferiores. Por outro lado, em um sistema de  $n$  máquinas síncronas existem  $(n^2 - n)$  limites inferiores. Logo, à medida que o número de máquinas cresce, tem-se um número considerável de limites

inferiores e conseqüentemente, a busca do domínio de estabilidade, conforme a descrição anterior, pode tornar-se penosa.

Por este motivo será proposta uma heurística de orientação da busca para a determinação de domínios, com o objetivo de diminuir os limites inferiores, tais que, neste conjunto encontra-se com segurança o domínio de estabilidade. Com isto, pode-se reduzir consideravelmente o tempo de processamento.

Neste sentido mostra-se graficamente o comportamento da energia potencial calculada correspondente à orientação dos limites inferiores e também em função das constantes  $z_k$  e  $z_{kp}$  que definem os hiperplanos (2.5.15) e (2.5.16) e que contém as faces de  $L_2$ , conforme os gráficos (2.11.1) a (2.11.4). Estas constantes  $z_k$  e  $z_{kp}$  são chamadas por conveniência de CH.

Os gráficos (2.11.1) e (2.11.2) são tirados de um mesmo exemplo, enquanto que (2.11.3) e (2.11.4) são obtidos de outro exemplo diferente do anterior.

Os gráficos (2.11.2) e (2.11.4) são desenhados por conveniência, tomando-se CH em módulo, de forma a utilizar somente o primeiro quadrante, com o propósito de comparação com os gráficos da energia potencial X limite inferior. Porém a cada CH,  $E_p$  é calculada em função do valor real de CH, isto é, conservando o sinal correspondente.

Observa-se nos gráficos (2.11.1) e (2.11.3), segundo à orientação dos limites inferiores, os quais apresentam-se de forma um tanto aleatória. Alguns casos, o comportamento deu-se dentro de uma certa regularidade, conforme o gráfico (2.11.1). A orientação de busca do domínio de estabilidade, neste caso, é fa

vorecida. Noutros casos, como em (2.11.3), não existe proporcionalidade entre a energia potencial e o limite inferior correspondente.

No caso dos gráficos (2.11.2) e (2.11.4) relativos à energia potencial em função de CH, seu comportamento apresenta uma certa uniformidade, existindo proporcionalidade entre estes valores. Em todos os casos observados nas experimentações efetuadas, o menor de CH em módulo correspondeu a mínima energia potencial. Então se for possível fornecer uma orientação de procura através de CH, pode-se encontrar com maior facilidade o domínio de estabilidade, com grande redução do tempo de processamento.

Por motivo de segurança, pode-se efetuar a procura do domínio de estabilidade em relação a um pequeno conjunto de CH em módulo, em ordem crescente, tal que, com certeza, encontra-se o domínio de estabilidade, segundo a orientação deste conjunto.

As conjeturas acima conduzem a um algoritmo heurístico descrito como segue:

Passo 1 - Encontrar o menor CH em módulo.

Este pode ser encontrado, de forma a economizar tempo de cálculo, quando se observa se o equilíbrio pós-defeito pertence a L, definido em (2.4.3). Retira-se do conjunto L o máximo valor (módulo) entre  $\alpha_i$  e  $\alpha_{ij}$  para  $i=1,2,\dots,n-1$ ;  $j \neq i$ . Se este procede de um valor positivo, neste caso o CH de interesse é obtido de (2.5.15) ou (2.5.16), conforme for o caso, utilizando  $+\pi$ . Caso contrário utiliza-se  $-\pi$ .

Fixar este valor na variável CHmin.

Passo 2 - Determinar o limite máximo CH de interesse, da seguinte forma:

$$CH_{\text{máx}} = K_a \cdot CH_{\text{min}} \quad (2.11.1)$$

Onde  $CH_{\text{máx}}$  é o máximo valor de CH de interesse e  $K_a$  uma constante que é determinada, de forma que envolva um pequeno conjunto de valores de CH em ordem crescente. Em todos os testes feitos observou-se que  $K_a$  em torno de 1.2 corresponde satisfatoriamente a segurança de busca.

Passo 3 - Gerar somente os CH inferiores em módulo ao  $CH_{\text{máx}}$ .

O número destes valores não ultrapassa a 10% do número total. Convém frizar que não há necessidade que se analise mais de  $n$  valores de CH. Então, se forem gerados mais de  $n$  valores, neste caso, toma-se apenas os  $n$  primeiros CH em ordem crescente.

Passo 4 - Gerar somente os limites inferiores correspondentes aos CH do passo 3.

Passo 5 - Utilizar o algoritmo de (2.7) utilizando os limites inferiores selecionados do passo 4.

Este passo pode ser substituído, calculando-se a energia potencial relativa a todos os CH do conjunto do passo 3. A energia do domínio de estabilidade corresponde a menor valor da energia potencial deste conjunto. Observa-se que ambos os

Energia Potencial

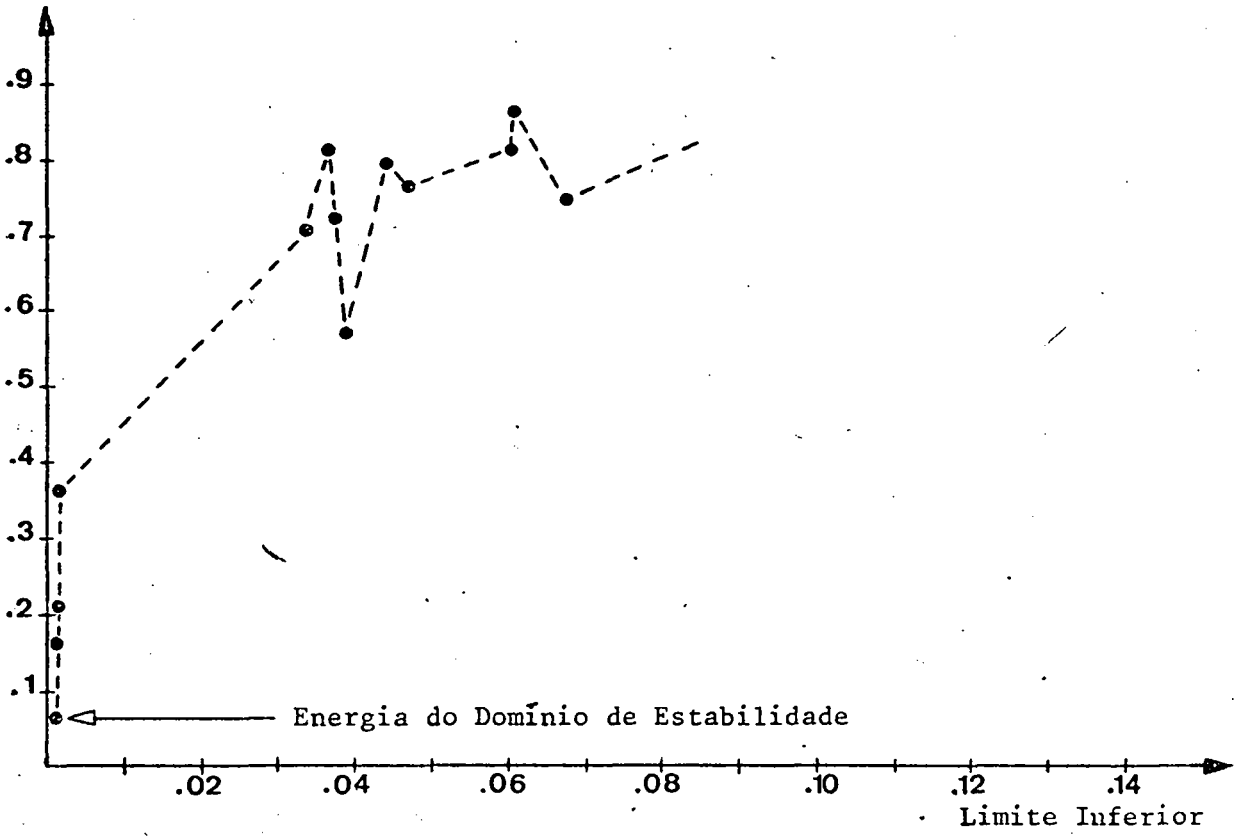


Gráfico 2.11.1 - Energia Potencial x Limite Inferior

Energia Potencial

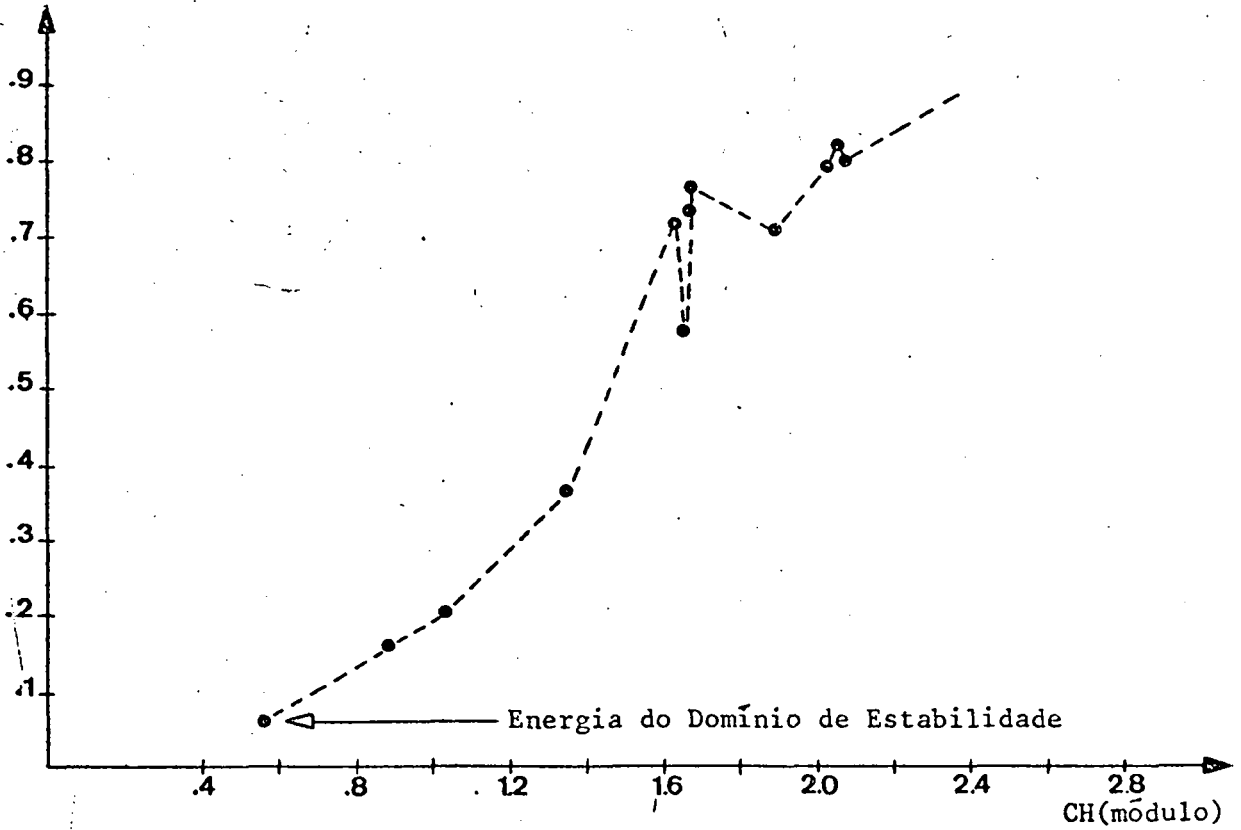


Gráfico 2.11.2 - Energia Potencial x CH (módulo)

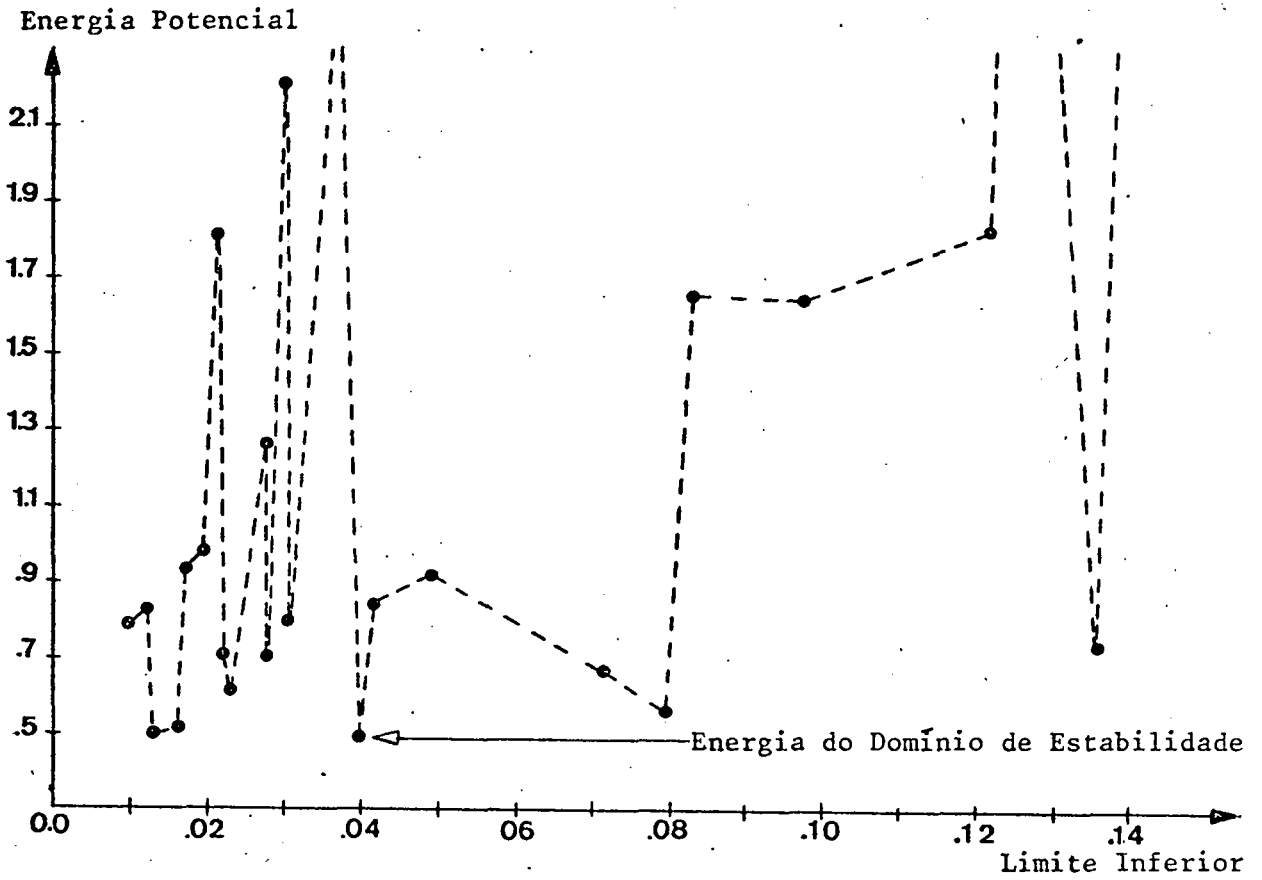


Gráfico 2.11.3 - Energia Potencial x Limite Inferior

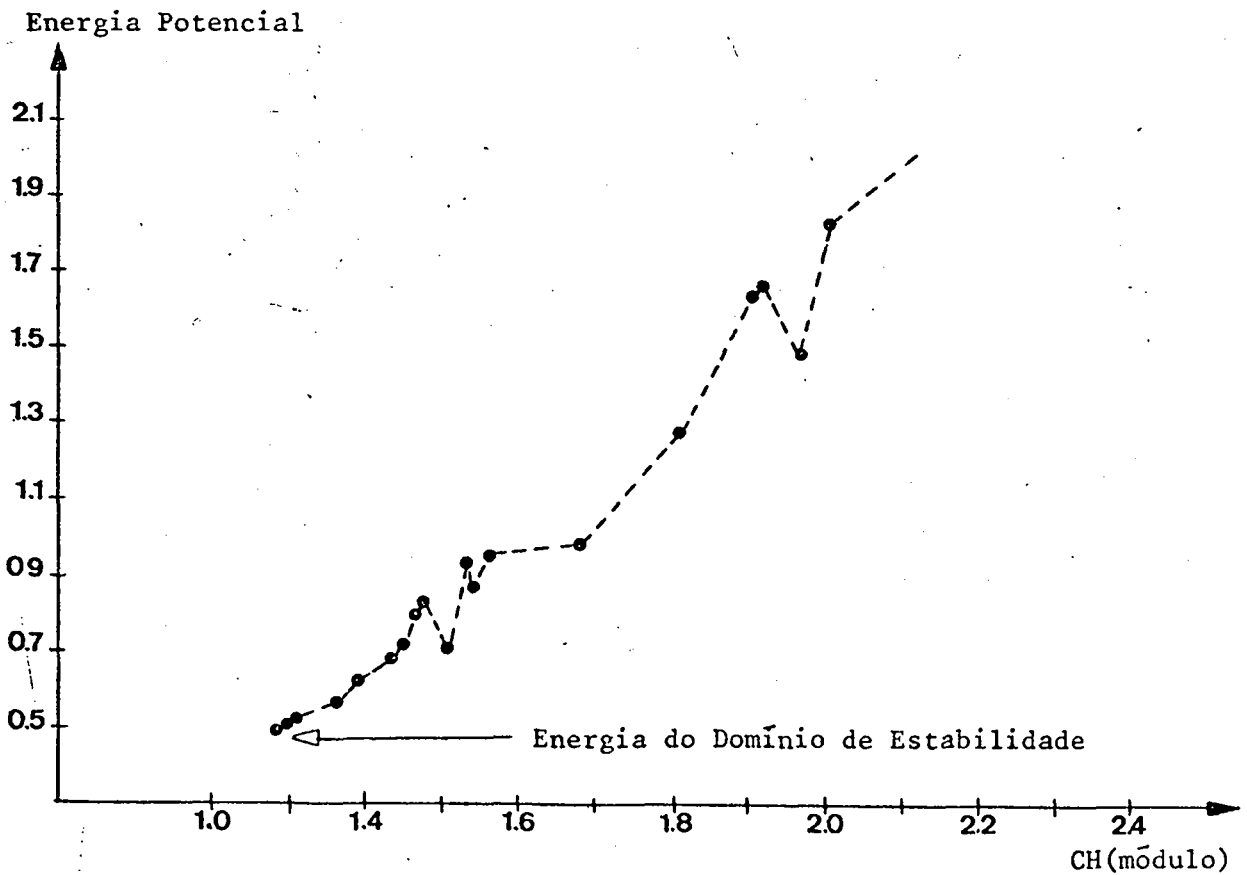


Gráfico 2.11.4 - Energia Potencial x CH(módulo)

processos, assim propostos, são equivalentes, pois no caso de utilizar o critério dos limites inferiores, fatalmente a energia potencial do domínio de estabilidade só será encontrada na última tentativa. Isto devido a característica dos limites inferiores selecionados.

### 2.11 - Conclusão

Neste capítulo foram abordados os estudos da análise da estabilidade transitória de um sistema de potência, envolvendo desde a descrição do modelo matemático que descreve a dinâmica do sistema em dois estados, até os estudos da estabilidade utilizando os conceitos do segundo método de Liapunov, bem como a determinação do domínio de estabilidade pelo método das tangências, na forma exata e aproximada. Foi também introduzido um algoritmo que possibilita a análise da estabilidade em tempo real.

Paralelamente foi proposto uma heurística de orientação da busca do domínio de estabilidade com o objetivo de reduzir o tempo de processamento.

No próximo capítulo será desenvolvido um método de eliminação de sobrecargas relativa à estabilidade transitória, baseado num modelo linearizado, obtido a partir da energia potencial calculada no ato da retirada do defeito e da energia do domínio de estabilidade. Este modelo será expresso em função dos níveis de injeções de potência do sistema.

## CAPÍTULO III

### MELHORIA DA SEGURANÇA

#### 3.1 - Introdução

Neste capítulo pretende-se desenvolver um algoritmo para eliminação de sobrecargas considerando a estabilidade transitória, mudando o ponto de equilíbrio do sistema através da realocação de geração e, como último recurso, através do alívio de carga. Isto é feito com o desenvolvimento de uma restrição que define um estado desejado de segurança do sistema, utilizando um modelo linearizado obtido a partir da energia potencial calculada no instante da retirada do defeito e a energia potencial do domínio de estabilidade. Uma vez satisfeita esta restrição em função de incrementos nas injeções de potência do sistema, certamente estar-se-á em segurança quanto a estabilidade transitória em relação a uma dada contingência.

#### 3.2 - Desenvolvimento da restrição da estabilidade transitória

Considerando as sobrecargas do tipo retirada de linhas de transmissão de operação, a análise da estabilidade transitória é traduzida em termos da energia potencial calculada no instante da retirada de uma linha e da energia do domínio de estabilidade.

A situação de sobrecarga a partir da definição de (2.8.1), implica que:

$$Ep(\alpha^0) > Ep(Z^*) \quad (3.2.1)$$

Onde:

$Ep(Z^*)$  é a energia potencial do domínio de estabilidade definida em (2.6.1),  $Ep(\alpha^0)$  representa a energia potencial calculada no instante da retirada da linha de operação e é expressa por:

$$Ep(\alpha) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} [-\cos(\alpha_{ij}) + \cos(\alpha_{ij}^e) - (\alpha_{ij} - \alpha_{ij}^e) \cdot \text{sen}(\alpha_{ij}^e)] + \\ + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} [-\cos \alpha_i + \cos \alpha_i^e - (\alpha_i - \alpha_i^e) \text{sen} \alpha_i^e] \quad (3.2.2)$$

Onde

$\alpha_{ij}$ ,  $\alpha_{ij}^e$  são os equilíbrios pré e pós-defeito.

Doravante serão adotados os subscritos a, d e e para representarem a situação pré-defeito, pós-defeito e o equilíbrio correspondente, respectivamente.

Observa-se que em (2.6.1)  $Ep(Z^*)$  é calculado no ponto de tangência com referência ao equilíbrio pós-defeito. Então  $Ep(Z^*)$  depende tanto de  $Z^*$  como  $\alpha^e$ , logo, tem-se assim dupla dependência. O mesmo acontece com a energia inicial de (3.2.2) que depende de  $\alpha^e$  e  $\alpha^d$ , desta forma, é conveniente representar (2.5.23) e (3.2.2) por:

$$E_p(Z^*, \alpha d^e) \quad (3.2.3)$$

e

$$E_p(\alpha a^e, \alpha d^e) \quad (3.2.4)$$

Linearizando (3.2.3) e (3.2.4) que são obtidos através da expansão da série de Taylor conservando somente os termos lineares, tem-se:

$$E_p(Z^* + \Delta Z, \alpha d^e + \Delta \alpha d) = E_p(Z^*, \alpha d^e) + \left[ \frac{\partial E_p(Z^*, \alpha d^e)}{\partial Z^*} \right]^t \cdot \Delta Z + \left[ \frac{\partial E_p(Z^*, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} \right]^t \cdot \Delta \alpha d \quad (3.3.5)$$

$$E_p(\alpha a^e + \Delta \alpha a, \alpha d^e + \Delta \alpha d) = E_p(\alpha a^e, \alpha d^e) + \left[ \frac{\partial E_p(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha a^e} \right]^t \cdot \Delta \alpha a + \left[ \frac{\partial E_p(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} \right]^t \cdot \Delta \alpha d \quad (3.3.6)$$

Onde  $t$  representa o transposto. e

$\Delta \alpha a$ ,  $\Delta \alpha d$  e  $\Delta Z$  são vetores das variáveis em torno dos equilíbrios pré, pós-defeito e tangência respectivamente, e:

$$\frac{\partial E_p(Z^*, \alpha d^e)}{\partial Z^*}, \quad \frac{\partial E_p(Z^*, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e}, \quad \frac{\partial E_p(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha a^e} \text{ e } \frac{\partial E_p(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} \text{ são os}$$

gradientes da energia potencial inicial e do domínio de estabilidade calculados com respeito aos respectivos equilíbrios e tangência, cujos componentes estão expressos a seguir;

$$\frac{\partial Ep(\alpha a_i^e, \alpha d_i^e)}{\partial \alpha a_i^e} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} [\text{sen}(\alpha a_i^e - \alpha a_j^e) - \text{sen}(\alpha d_i^e - \alpha d_j^e)] + \\ + F_{in} [\text{sen} \alpha a_i^e - \text{sen} \alpha d_i^e] \quad (3.2.7)$$

Para  $i=1, 2, \dots, n-1$

$$\frac{\partial Ep(\alpha a_i^e, \alpha d_i^e)}{\partial \alpha d_i^e} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} [-(\alpha a_i^e - \alpha a_j^e - \alpha d_i^e + \alpha d_j^e) \cdot \cos(\alpha d_i^e - \alpha d_j^e)] + \\ + F_{in} [-(\alpha a_i^e - \alpha d_i^e) \cdot \cos \alpha d_i^e] \quad (3.2.8)$$

Para  $i=1, 2, \dots, n-1$

$$\frac{\partial Ep(z_i^*, \alpha d_i^e)}{\partial z_i^*} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} [\text{sen}(z_{ij}^* + \alpha d_{ij}^e) - \text{sen} \alpha d_{ij}^e] + \\ + F_{in} [\text{sen}(z_i^* + \alpha d_i^e) - \text{sen} \alpha d_i^e] \quad (3.2.9)$$

Para  $i=1, 2, \dots, n-1$

$$\frac{\partial Ep(z_i^*, \alpha d_i^e)}{\partial \alpha d_i^e} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} [\text{sen}(z_{ij}^* + \alpha d_{ij}^e) - \text{sen} \alpha d_{ij}^e - z_{ij}^* \cos \alpha d_{ij}^e] + \\ + F_{in} [\text{sen}(z_i^* + \alpha d_i^e) - \text{sen} \alpha d_i^e - z_i^* \cos \alpha d_i^e] \quad (3.2.10)$$

Para  $i=1, 2, \dots, n-1$

Se o sistema estiver com sobrecarga, isto pode ser eliminado se conseguirmos que: o ponto de operação seja alterado, através da modificação de injeções de potência, de modo que se tenha:

$$Ep(\alpha a^e + \Delta\alpha a, \alpha d^e + \Delta\alpha d) \leq Ep(Z^* + \Delta Z, \alpha d^e + \Delta\alpha d) \quad (3.2.11)$$

Este objetivo pode ser alcançado da forma abaixo. A partir (3.2.11) faz-se:

$$Ep(\alpha a^e + \Delta\alpha a, \alpha d^e + \Delta\alpha d) = \xi \cdot Ep(Z^* + \Delta Z, \alpha d^e + \Delta\alpha d) \quad (3.2.12)$$

Onde

$\xi$  é tal que  $0 \leq \xi \leq 1$ , e é chamado de índice de estabilidade.

O que se pretende com este propósito é efetuar uma mudança no equilíbrio do sistema com o objetivo de que (3.2.11) seja satisfeito. Desta forma "obriga-se" que os estados, no instante da retirada da linha, pertençam ao domínio de estabilidade.

Substituindo (3.2.5) e (3.2.6) em (3.2.12), tem-se:

$$\begin{aligned} Ep(\alpha a^e, \alpha d^e) + \left[ \frac{\partial Ep(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha a^e} \right]^t \cdot \Delta\alpha a + \left[ \frac{\partial Ep(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} \right]^t \cdot \Delta\alpha d = \xi \cdot \{ Ep(Z^*, \alpha d^e) \\ + \left[ \frac{\partial Ep(Z^*, \alpha d^e)}{\partial Z^*} \right]^t \cdot \Delta Z + \left[ \frac{\partial Ep(Z^*, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} \right]^t \cdot \Delta\alpha d \} \quad (3.2.13) \end{aligned}$$

Observando a solução do problema de obtenção do ponto de tangência em (2.6.3) ou (2.6.4), nota-se que este é dependente do equilíbrio de defeito. Então, supondo agora que se possa expressar de forma aproximada a variação da tangência em função da mudança do ponto de equilíbrio, por um modelo linear da seguinte forma:

$$\Delta Z = A \cdot \Delta \alpha d \quad (3.2.14)$$

Onde

$A(n-1) \times (n-1)$  é a matriz de sensibilidade entre a variação do ponto de tangência e a variação do ponto de equilíbrio pós-defeito.

Substituindo (3.2.14) em (3.2.13) e reagrupando em função das variáveis  $\Delta \alpha a$  e  $\Delta \alpha d$ , tem-se:

$$\left[ \frac{\partial Ep(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha a^e} \right]^t \cdot \Delta \alpha a + \left\{ \left[ \frac{\partial Ep(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} \right] - \xi \cdot \left[ \frac{Ep(Z^*, \alpha d^e)}{\partial Z^*} \right] \cdot A - \xi \cdot \left[ \frac{\partial Ep(Z^*, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} \right]^t \right\} \cdot \Delta \alpha d = \xi \cdot Ep(Z^*, \alpha a^e) - Ep(\alpha a^e, \alpha d^e) \quad (3.2.15)$$

Fazendo:

$$C = \left[ \frac{\partial Ep(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha a^e} \right] \quad (3.2.16)$$

$$D = \left[ \frac{\partial Ep(\alpha a^e, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} - \xi \cdot \frac{\partial Ep(Z^*, \alpha d^e)}{\partial Z^*} \cdot A - \xi \cdot \frac{Ep(Z^*, \alpha d^e)}{\partial \alpha d^e} \right] \quad (3.2.17)$$

$$e \quad b = \xi \cdot Ep(Z^*, \alpha a^e) - Ep(\alpha a^e, \alpha d^e) \quad (3.2.18)$$

Substituindo (3.2.16), (3.2.17) e (3.2.18) em (3.2.15), obtém-se:

$$C^t \cdot \Delta \alpha a + D^t \cdot \Delta \alpha d = b \quad (3.2.19)$$

As variáveis de (3.2.19) são essencialmente variáveis dependentes do sistema, por isso, é necessário expressar (3.2.19) em função das variáveis de controle, isto é, as injeções de potência.

Uma rede de  $m$  barras em estado de equilíbrio, é caracterizada por  $2m$  equações algébricas não lineares que relacionam as injeções e as potências transportadas através das linhas que incidem em cada barra. O modelo linear pode ser derivado destas equações utilizando a expansão de Taylor, conservando somente os termos lineares. Isto é semelhante a utilização de um fluxo de potência DC, conforme usualmente feito em sistema de potência, porém considerando carga variável ([29, 31]).

Por conveniência pode-se representar a rede através de barras essencialmente de geração ou de carga. Tomando-se somente o modelo de potência ativa tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \dots \\ -\Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \theta} \end{bmatrix} \cdot \Delta \theta \quad (3.2.20)$$

Onde

$\Delta P_G$  é a mudança na potência ativa dos geradores,  $\Delta P_L$  representa a mudança na carga,  $\Delta \theta$  variação dos ângulos de tensão de barras e  $f$  é a função de transporte de potência em cada barra.

Fazendo:

$$H = \left[ \frac{\partial f}{\partial \theta} \right] \quad (3.2.21)$$

Assim a equação (3.2.20) pode ser escrita em forma particionada do seguinte modo:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \dots \\ -\Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{GG} & \vdots & H_{GL} \\ \dots & \vdots & \dots \\ H_{LG} & \vdots & H_{LL} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \alpha_G \\ \dots \\ \Delta \theta_L \end{bmatrix} \quad (3.2.22)$$

Onde o subscrito G representa as barras de geração e L refere-se às barras restantes do sistema.

Na equação (3.2.22) está excluído a n-ésima máquina que foi tomada como referência. Então H é de dimensão (m-1)x(m-1). Decompondo (3.2.22) em dois subsistemas, fica:

$$\Delta P_G = H_{GG} \cdot \Delta \alpha_G + H_{GL} \cdot \Delta \theta_L \quad (3.2.23)$$

$$-\Delta P_L = H_{LG} \cdot \Delta \alpha_G + H_{LL} \cdot \Delta \theta_L \quad (3.2.24)$$

Da equação (3.2.24) obtém-se  $\Delta \theta_L$ :

$$\Delta \theta_L = H_{LL}^{-1} \cdot (-\Delta P_L - H_{LG} \cdot \Delta \alpha_G) \quad (3.2.25)$$

Substituindo (3.2.25) em (3.2.23), pode-se expressar  $\Delta P_G$  por:

$$\Delta P_G = H_{GG} \cdot \Delta \alpha_G + H_{GL} \cdot [H_{LL}^{-1} \cdot (-\Delta P_L - H_{LG} \cdot \Delta \alpha_G)] \quad (3.2.26)$$

ou

$$\Delta P_G + H_{GL} \cdot H_{LL}^{-1} \cdot \Delta P_L = (H_{GG} - H_{GL} \cdot H_{LL}^{-1} \cdot H_{LG}) \cdot \Delta \alpha_G \quad (3.2.27)$$

Fazendo  $H_G = [H_{GL} \cdot H_{LL}^{-1}]$  (3.2.28)

e  $H_{red} = [H_{GG} - H_{GL} \cdot H_{LL}^{-1} \cdot H_{LG}]$  (3.2.29)

substituindo (3.2.28) e (3.2.29) em (3.2.27), assim tem-se:

$$\Delta P_G + H_G \cdot \Delta P_L = H_{red} \cdot \Delta \alpha_G \quad (3.2.30)$$

finalmente obtém-se de (3.2.30):

$$H_{red}^{-1} \cdot (\Delta P_G + H_G \cdot \Delta P_L) = \Delta \alpha_G \quad (3.2.31)$$

Esta equação mostra a variação dos ângulos de máquina em função da mudança do nível de geração ou do nível de carga quando houver corte de carga. Viu-se na seção (2.3) que a potência mecânica das máquinas é suposta constante durante o transitório, então  $\Delta P_G$  será o mesmo tanto na situação de pré-defeito como também no pós-defeito.  $\Delta P_L$  também é o mesmo em ambas as situações. Desta forma, pode-se representar as variações dos ângulos a partir de (3.2.31) da seguinte forma:

Situação pré-defeito:

$$H_{red}_a^{-1} \cdot (\Delta P_G + H_{Ga} \cdot \Delta P_L) = \Delta \alpha_a \quad (3.2.32)$$

Situação pós-defeito:

$$H_{red_d}^{-1} (\Delta P_G + H_{Gd} \cdot \Delta P_L) = \Delta \alpha d \quad (3.2.33)$$

Substituindo estas equações em (3.2.19), obtem-se:

$$C^t \cdot [H_{red_a}^{-1} \cdot \Delta P_G + H_{red_a}^{-1} \cdot H_{Ga} \cdot \Delta P_L] + D^t \cdot [H_{red_d}^{-1} \cdot \Delta P_G - H_{red_d}^{-1} \cdot H_{Gd} \cdot \Delta P_L] = b \quad (3.2.34)$$

Reagrupando  $\Delta P_G$  e  $\Delta P_L$ , tem-se;

$$[C^t \cdot H_{red_a}^{-1} + D^t \cdot H_{red_d}^{-1}] \cdot \Delta P_G + [C^t \cdot H_{red_a}^{-1} \cdot H_{Ga} + D^t \cdot H_{red_d}^{-1} \cdot H_{Gd}] \cdot \Delta P_L = b \quad (3.2.35)$$

Fazendo:

$$R^t = [C^t \cdot H_{red_a}^{-1} + D^t \cdot H_{red_d}^{-1}] \quad (3.2.36)$$

$$e \quad S^t = [C^t \cdot H_{red_a}^{-1} \cdot H_{Ga} + D^t \cdot H_{red_d}^{-1} \cdot H_{Gd}] \quad (3.2.37)$$

Substituindo (3.2.36) e (3.2.37) em (3.2.35), obtem-se:

$$R^t \cdot \Delta P_G + S^t \cdot \Delta P_L = b \quad (3.2.38)$$

Colocando sob a forma matricial;

$$\begin{bmatrix} R^t & \vdots & S^t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \dots \\ \Delta P_L \end{bmatrix} = b \quad (3.2.39)$$

Esta equação representa a restrição da estabilidade de transitória de um sistema de potência, onde R e S são vetores de coeficientes e b é uma constante.

Então dado R, S e b, calculados a partir de uma situação normal e de uma contingência, se  $\exists \Delta P_G$  ou  $\Delta P_L$  tal que (3.2.39) é satisfeita, então como (3.2.39) vem de (3.2.19) segue que existe  $\Delta \alpha$  e  $\Delta \alpha_d$  que satisfaz (3.2.19). Assim (3.2.12) é satisfeita para um certo  $\xi$  especificado. Portanto verifica-se (3.2.11)', e neste caso há estabilidade.

Observa-se que (3.2.39) admite uma infinidade de soluções. No sentido de escolher uma entre as diversas soluções, propõe-se adiante um problema de otimização, de modo que a sua solução forneça um incremento no ponto de operação que satisfaz (3.2.11) e minimize algum critério estabelecido. Para isto é necessário algumas considerações que são apresentadas no item seguinte, tendo em vista que o exposto acima procede desde que se conheça também a matriz A definida em (3.2.14).

### 3.3 - Determinação da variação da tangência em função da mudança do equilíbrio pós-defeito

Observa-se em (2.6.3) e (2.6.4) que o gradiente possui somente a última componente não nula. Assim, a solução do problema da tangência é equivalente ao produto da última coluna da inversa do jacobiano pelo valor da última componente de  $[-\nabla E(0)]$ . Então a solução de (2.6.3) ou (2.6.4) pode ser escrita:

$$\begin{bmatrix} z_1^* \\ z_2^* \\ \vdots \\ z_{n-1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \boxed{\begin{array}{l} \text{n-ésima componente de} \\ [-\nabla E(0)] \end{array}} \quad (3.3.1)$$

$$\text{ou } z_i^* = v_i \cdot Q_k, \text{ para } i=1,2, \dots, n-1. \quad (3.3.2)$$

onde  $v_i$  é a  $i$ -ésima componente da  $n$ -ésima coluna da inversa do jacobiano e  $Q_k$  é a  $n$ -ésima componente de  $[-\nabla E(0)]$ .

Determinando a variação da tangência, no caso das faces serem do tipo (2.5.15), tem-se:

$$z_i^* = v_i (\pm \pi - 2\alpha_k^e) \text{ para } i=1,2, \dots, n-1. \quad (2.3.3)$$

Observa-se que  $v_i$  é a  $i$ -ésima componente da última coluna da inversa da matriz jacobiana, que é dependente do equilíbrio do sistema. Desta forma, quando processada uma mudança em seu equilíbrio, haverá alteração nas componentes do jacobiano. Por

outro lado, esta variação pode ser desprezada pelas mesmas razões atribuídas para aceitação de um fluxo de potência linear ([29, 30]). Pode-se admitir, então, que  $v_i$  permanece constante quando ocorre pequenas mudanças no ponto de equilíbrio. Então, usando-se (3.3.3), o acréscimo no estado de equilíbrio, implica em acréscimo no ponto de tangência dada por:

$$z_i^* + \Delta z_i = v_i [\pm \pi - 2(\alpha_k^e + \Delta \alpha_k)] \quad (3.3.4)$$

$$\text{ou } z_i^* + \Delta z_i = v_i [\pm \pi - 2\alpha_k^e] - 2v_i \cdot \Delta \alpha_k \quad (3.3.5)$$

para  $i=1,2, \dots, n-1$ .

Pode-se tirar de (3.3.5) a relação da variação da tangência em função da variação do equilíbrio:

$$\Delta z_i = -2 \cdot v_i \cdot \Delta \alpha_k, \text{ para } i=1,2, \dots, n-1. \quad (3.3.6)$$

A matriz A de (3.2.14), neste caso, possui todas as componentes nulas exceto a k-ésima coluna que é dada por  $-2 \cdot v_i$ , para  $i=1,2, \dots, n-1$ :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \vdots & -2 \cdot v_1 & \vdots & 0 & \dots & 0 \\ & & & \vdots & -2 \cdot v_2 & \vdots & & & \\ & & & \vdots & \vdots & \vdots & & & \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & -2 \cdot v_{n-1} & \vdots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3.7)$$

coluna k

A matriz A também poderia ser obtida a partir da linearização dos elementos de (2.6.3).

Quando as faces forem do tipo (2.5.16), a variação da tangência é obtida de

$$z_i^* + \Delta z_i = v_i [\pm \pi - 2(\alpha_k^e + \Delta \alpha_k - (\alpha_p^e + \Delta \alpha_p))] \quad (3.3.8)$$

trabalhando algebricamente esta equação, tira-se, da mesma forma:

$$\Delta z_i = -2v_i \cdot \Delta \alpha_k + 2 \cdot v_i \cdot \Delta \alpha_p \quad (3.3.9)$$

para  $i=1,2, \dots, n-1$ .

A partir de (3.3.9) pode-se escrever a matriz A, a qual é formada de zeros exceto a k-ésima e a p-ésima colunas;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \vdots & -2 \cdot v_1 & \vdots & 0 & \vdots & 2 \cdot v_1 & \vdots & 0 & \dots & 0 \\ & & & \vdots & -2 \cdot v_2 & \vdots & & \vdots & 2 \cdot v_2 & \vdots & & & \\ & & & \vdots & -2 \cdot v_3 & \vdots & & \vdots & 2 \cdot v_3 & \vdots & & & \\ & & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & \\ & & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & \\ & & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & \\ & & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & \\ & & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & -2 \cdot v_{n-1} & \vdots & 0 & \vdots & 2 \cdot v_{n-1} & \vdots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3.10)$$

coluna k                  coluna p

A solução dada pelo método das tangências proposta neste trabalho é obtida utilizando a decomposição LU como já vis

to anteriormente. Desta maneira desconhece-se os valores de  $v_i$ , necessários para a composição da matriz A, tanto em (3.3.7) como em (3.3.10). Por outro lado conhece-se  $z_i^*$  e  $Q_k$ , então pode-se encontrar  $v_i$ , tirando-se de (3.3.2):

$$v_i = \frac{z_i^*}{Q_k} \quad \text{para } i=1,2, \dots, n-1. \quad (3.3.11)$$

### 3.4 - Algoritmo de determinação dos parâmetros da restrição da estabilidade transitória

Esta seção tem o objetivo de mostrar o fluxograma para determinação dos vetores de coeficientes R, S e da constante b que definem a restrição da estabilidade transitória. Estes se rão utilizados na formulação do problema de otimização, cujos estudos seguem no próximo capítulo.

Este fluxograma está representado na figura (3.4.1).

### 3.5 - Conclusão

Neste capítulo, através da linearização da função de Liapunov, foram desenvolvidas expressões, que relacionam variações do ponto de equilíbrio pós-defeito, em função de um certo nível de operação, com variações da geração do sistema.

Foi mostrado como relacionam as variações do ponto de tangência com as variações do ponto de equilíbrio.

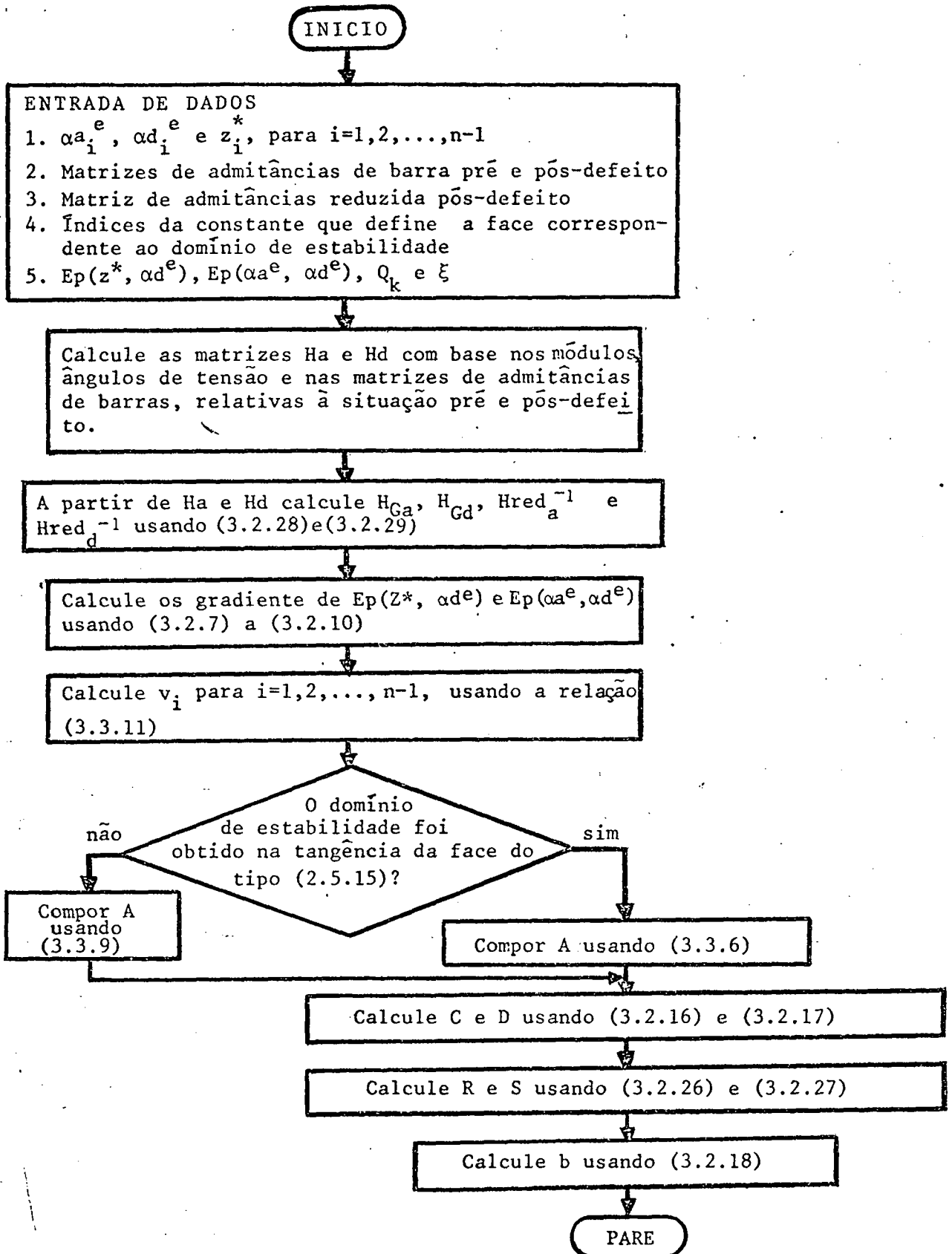


Figura 3.4.1 - Fluxograma do algoritmo para obtenção da constante  $b$ , dos vetores de coeficientes  $R$  e  $S$ , necessários para a composição da restrição da estabilidade transitória.

Em seguida foi fornecido um procedimento para a de terminação das constantes envolvidas nas relações acima.

Mostrou-se que existem infinidade de soluções para o problema de determinação dos valores das variações dos níveis de geração e carga para a eliminação de sobrecarga.

Apresenta-se, no capítulo seguinte, a formulação de um problema de otimização que, mediante um critério estabelecido, fornece uma entre as soluções.

## C A P Í T U L O    I V

### APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR EM SEGURANÇA DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

#### 4.1 - Introdução

Um sistema elétrico de potência pode sofrer violação na sua segurança devido à retirada de alguma linha de operação, acarretando problema de estabilidade transitória e sobrecargas na transmissão. Isto requer medidas corretivas, mudando-se os níveis de injeções no sistema, por exemplo. Este processo é formulado através de um problema de otimização, minimizando o desvio do estado nominal de geração e minimizando o corte de carga, se necessário, sujeito as restrições impostas. Prevalece a realocação da geração como solução. O corte nas cargas deverá ser utilizado como último recurso. Esta seleção é feita apropriadamente na formulação do problema na programação linear.

#### 4.2 - Formulação do problema

O objetivo deste problema de otimização é minimizar o desvio do estado nominal de geração e minimizar o alívio de carga sujeito às restrições de estabilidade transitória, transmissão, geração, carga e balanço de potência. Este objetivo é traduzido através da minimização de uma função escalar que é a soma de

duas parcelas: A primeira, é correspondente ao desvio na geração e a segunda, refere-se ao alívio de carga. Esta função pode ser escrita mais precisamente da seguinte forma ([29]):

$$FO = \sum_{i=1}^{n-1} g_i (\Delta P_{Gi}) + \sum_{i=1}^{nl} h_i (\Delta P_{Li}) \quad (4.2.1)$$

onde  $g$  e  $h$  são funções não lineares.

É de interesse que a solução do problema seja alcançado através da realocação de geração, mas se não for possível, utiliza-se, como recurso, o alívio de carga. Isto é feito fazendo que a função  $h$  seja mais penalizada que a função  $g$ .

A minimização da FO está sujeito às seguintes restrições:

- Estabilidade transitória (de (3.2,39))

$$S^t \Delta P_G + R^t \Delta P_L = b$$

- Carregamento na transmissão em termo do ângulos de tensão através das linhas.

$$0 \leq |\theta_i - \theta_j| \leq \overline{\theta}_{ij} \quad \text{para } i, j = 1, 2, \dots, nt$$

- Potência ativa das máquinas

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \quad \text{para } i=1, 2, \dots, n-1$$

- Cargas

$$0 \leq PL_i \leq \overline{PL}_i \quad \text{para } i=1,2,\dots,nl$$

- Balanço de potência

$$\sum_{i=j}^n PG_i = \sum_{i=1}^{nl} PL_i$$

onde:

$nt$  - nº de linhas de transmissão

$nb$  - nº de barras do sistema

$n$  - nº de barras de geração

$nl$  - nº de barras de carga.

$\overline{\theta}_{ij}$  - máximo defasamento nas linhas de transmissão entre a  $i$ -ésima e  $j$ -ésima barra.

$\overline{PG}_i, \underline{PG}_i$  - limite de despacho do gerador  $i$ .

$\overline{PL}_i$  - Carga atual da  $i$ -ésima barra.

#### 4.3 - Restrição de estabilidade transitória

Este estudo foi desenvolvido no capítulo 3. Esta restrição é assim descrita conforme (3.2.38):

$$S.^t \Delta PG + R.^t \Delta PL = b \quad (4.3.1)$$

A restrição (4.3.1) foi desenvolvida com o objetivo de se atingir um determinado índice de estabilidade desejado, apar

tir de um sistema que se encontra em sobrecarga, isto é, procura-se posicionar a energia inicial em relação domínio de estabilidade onde se queira. Por outro lado, acha-se conveniente abordar o problema de outra forma, permitindo assim maior maleabilidade ao método, com a seguinte proposição:

Encontrar uma solução tal que o índice de estabilidade não ultrapasse a um determinado valor, que pode ser transformado na seguinte equação:

$$S^t \Delta P_G + R^t \Delta P_L \leq b \quad (4.3.2)$$

Assim, esta restrição determina que o índice de estabilidade seja menor ou igual a  $\xi$ . Pode-se transformar a equação (4.3.2) em igualdade recorrendo ao uso de uma variável de folga  $r$ :

$$S^t \Delta P_G + R^t \Delta P_L + r = b \quad (4.3.3)$$

Quando o sistema se encontra em sobrecarga, a solução do problema tende a ficar no limite máximo  $\xi$ , sendo que só atingirá um valor menor devido a imposição de outras restrições.

Quando não houver sobrecarga, a tendência da solução é permanecer no estado nominal. Qualquer outra situação que melhore ou piore o índice de estabilidade será sob maior esforço. Assim, este caso pode ser utilizado quando a eliminação de sobrecargas referem-se à outras funções de segurança, funcionando como proteção à estabilidade transitória.

#### 4.4 - Restrição de transmissão

Os limites de carregamento nas linhas de transmissão podem ser traduzidos pelo fluxo de corrente como consideração térmica ou pela diferença de ângulos de tensão através das linhas como consideração de estabilidade ([31]).

A formulação com respeito a diferença de ângulos de tensão na transmissão entre as barras  $i$  e  $j$ , pode ser expressa como:

$$0 \leq |\theta_i - \theta_j| \leq \overline{\theta}_{ij} \quad (4.4.1)$$

Em termos de incrementos (4.4.1) é dado por:

$$\underline{\Delta\theta} \leq (\Delta\theta_i - \Delta\theta_j) \leq \overline{\Delta\theta} \quad (4.4.2)$$

Esta restrição deve ser colocada em termos das injeções de potências nas barras do sistema, utilizando o modelo incremental da rede representada pela equação (3.2.21). Esta transformação é dada por ([30,35]):

$$\underline{\Delta\theta} \leq B \cdot \Delta P \leq \overline{\Delta\theta} \quad (4.4.3)$$

onde  $\underline{\Delta\theta}$  e  $\overline{\Delta\theta}$  são os limites na mudança nos fluxos dos ramos do estado nominal.  $\Delta P$  é o vetor dos incrementos nas injeções de potência e  $B$  é uma matriz cujos elementos são fatores de distribuição que relaciona a mudança no fluxo com a mudança nas injeções, que

é obtida a partir da inversa da matriz  $H$  (3.2.21) excluindo a barra de folga, por consequência  $B$  é uma matriz não esparsa ([29, 30]).

A restrição (4.4.3) representa os limites de mudança nos fluxos dos ramos de transmissão em torno do estado inicial da rede.

O propósito deste trabalho tem como meta a eliminação de sobrecargas relativas à estabilidade transitória, por isso omite-se a introdução da restrição que se relacione com sobrecargas de ramos, pois existe farta bibliografia que trata deste assunto ([29 a 39]). Apenas fez-se uma abordagem rápida a título de informação.

#### 4.5 - Restrição de potência das máquinas e de cargas

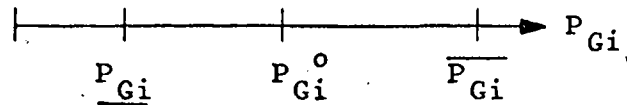
As restrições para potência ativa para a geração e para as cargas ativa podem ser matematicamente expressas:

$$\text{Geração} \quad \underline{P_{Gi}} \leq P_{Gi} \leq \overline{P_{Gi}} \quad (4.5.1)$$

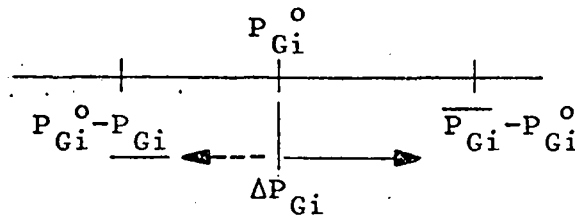
$$\text{Carga} \quad 0 \leq PL_i \leq \overline{PL_i} \quad (4.5.2)$$

A restrição com respeito a geração é imposta pela característica de operação, cujos limites superior e inferior podem ser determinados em função da máxima carga que pode ser suprida por um gerador, estabilidade das turbinas, reserva girante, etc.

Seja  $P_{Gi}^0$  o estado nominal de geração, graficamente pode-se expressar estes limites:



Tomando (4.5.1) em função de  $\Delta P_{Gi}$ , tal que :  $P_{Gi}^o$  se ja colocado na origem, obtem-se:



matematicamente, tem-se:

$$P_{Gi}^o - \underline{P_{Gi}} \leq \Delta P_{Gi} \leq \overline{P_{Gi}} - P_{Gi}^o \quad \text{para } i=1,2,\dots,n-1 \quad (4.5.3)$$

Com referência a restrição de carga, tomando (4.5.2) em função de incrementos nas cargas:

$$-\overline{P_{Li}} \leq \Delta P_{Li} \leq 0 \quad \text{para } i=1,2,\dots,n \quad (4.5.4)$$

Na equação (4.5.3) está excluída a n-ésima máquina que é tomada como referência.

#### 4.6 - Restrição do balanço de potência

A geração total do sistema deve atender a demanda solicitada. Desprezando as perdas na transmissão, pode-se escre-

vê-la:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^{nl} P_{Li} = 0 \quad (4.6.1)$$

Seja  $P_{Gi}^0$  e  $P_{Li}^0$  as gerações e cargas iniciais do sistema, os incrementos nestas variáveis podem ser expressas:

$$\sum_{i=1}^n (P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}) - \sum_{i=1}^{nl} (P_{Li}^0 + \Delta P_{Li}) = 0 \quad (4.6.2)$$

Assim, desdobrando a equação (4.6.2) em função das variáveis incrementais, tem-se:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \Delta P_{Gi} - \sum_{i=1}^{nl} \Delta P_{Li} = 0 \quad (4.6.3)$$

#### 4.7 - Construção da função objetivo

Será adotado para a função objetivo, penalidades que dependem dos custos de geração e dos custos de corte de carga. Então, a função objetivo (4.2.1) são parcelas não lineares que dependem destes custos.

O problema de programação linear requer que estes custos sejam funções lineares. Então deve-se construir esta função por aproximações através de vários segmentos lineares.

Existem diferentes tipos de funções objetivo utili-

zadas em segurança dos sistemas de potência. A função adotada neste trabalho, em relação à geração, é representada por dois segmentos lineares, conforme a figura (4.7.1) ([30]).

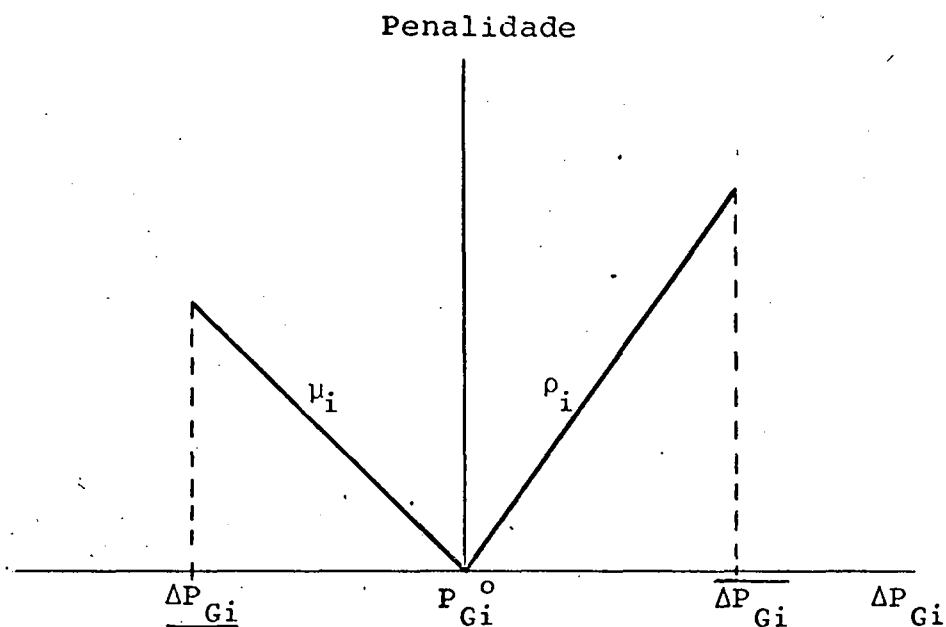


Figura (4.7.1) - Função objetivo linearizada por partes para a mudança do estado nominal de geração.

Desdobrando esta função em duas outras variáveis  $\Delta P_{Gi}^+$  e  $\Delta P_{Gi}^-$  ([29], [35]), relativos aos incrementos positivo e negativo ao estado nominal de geração, respectivamente. Pode-se expressar (4.2.1) da seguinte forma:

$$FO = \sum_{i=1}^{n-1} (\rho_i \Delta P_{Gi}^+ + \mu_i \Delta P_{Gi}^-) + \sum_{i=1}^{nl} h_i (\Delta P_{Li}) \quad (4.7.1)$$

Onde  $\rho_i$  e  $\mu_i$  são grandezas positivas que representam a inclinação

dos segmentos, e:

$$\Delta P_{Gi} \triangleq \Delta P_{Gi}^+ - \Delta P_{Gi}^- \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (4.7.2)$$

$$0 \leq \Delta P_{Gi}^+ \leq \overline{P_{Gi}} - P_{Gi}^0 \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (4.7.3)$$

$$0 \leq \Delta P_{Gi}^- \leq P_{Gi}^0 - \underline{P_{Gi}} \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (4.7.4)$$

Observa-se que se esta função objetivo fosse aproximada por um número maior de segmentos, haveria um aumento considerável de variáveis na programação linear que tornaria difícil a sua utilização, principalmente em tempo real.

Com referência às penalidades das cargas, elas podem ser representadas por rampas, cuja inclinação  $\gamma_i$  é uma grandeza positiva, feita geralmente em torno de 50 a 100 vezes maior que as penalidades relativas aos geradores ([29]). Dando-se assim prioridade para que a solução do problema de sobrecargas seja alcançado através da realocação de geração. O alívio de carga, neste caso, será utilizado como último recurso.  $\gamma_i$  depende das prioridades e importâncias das cargas, então pode-se escrever (4.7.1) como:

$$FO = \sum_{i=1}^{n-1} (\rho_i \cdot \Delta P_{Gi}^+ + \mu_i \cdot \Delta P_{Gi}^-) + \sum_{i=1}^{n\ell} (-\gamma_i \cdot \Delta P_{Li}) \quad (4.7.5)$$

A solução padrão de um problema de programação li-

near é sempre maior ou igual a zero e como  $\Delta P_{Li}$  é um incremento negativo pela própria característica de ser corte de carga, por isso deve-se ajustá-lo de maneira a compatibilizá-lo com a solução padrão, convertendo-o pela simples mudança de sinal:

$$\Delta P_{Li}^{\Delta} - \Delta P_{Li}^{\prime} \quad i=1,2,\dots,nl \quad (4.7.6)$$

Substituindo (4.7.6) em (4.7.5), tem-se:

$$FO = \sum_{i=1}^{n-1} (\rho_i \cdot \Delta P_{Gi}^+ + \mu_i \cdot \Delta P_{Gi}^-) + \sum_{i=1}^{nl} \gamma_i \Delta P_{Li}^{\prime} \quad (4.7.7)$$

Substituindo (4.7.2) e (4.7.6) em (4.3.3), (4.5.4) e (4.6.3), obtem-se as seguintes restrições:

$$R^t \Delta P_G^+ - R^t \Delta P_G^- - S^t \Delta P_L^{\prime} + r = b \quad (4.7.8)$$

$$0 \leq \Delta P_{Li}^{\prime} \leq P_{Li}^0 \quad (4.7.9)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} (\Delta P_{Gi}^+ - \Delta P_{Gi}^-) + \sum_{i=1}^{nl} \Delta P_{Li}^{\prime} = 0 \quad (4.7.10)$$

Concluindo, o problema de eliminação de sobrecargas é resolvido minimizando a função objetivo (4.7.7) sujeito as restrições (4.7.3), (4.7.4), (4.7.8), (4.7.9) e (4.7.10).

4.8 - Método de solução

A forma padrão do problema da programação linear é:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad C^t \underline{X} \\ \text{Sujeito} \quad & A \cdot \underline{X} = \underline{b} \\ & e \quad x_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,m \end{aligned} \quad (4.8.1)$$

onde: A é uma matriz de constantes, C um vetor de coeficientes de custos, b vetor de constante e X o vetor solução.

Mas o presente problema tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad C^t \underline{X} \\ \text{sujeito} \quad & A \cdot \underline{X} = \underline{b} \\ & e \quad 0 \leq x_i \leq s_i \quad i=1,2,\dots,m \end{aligned} \quad (4.8.2)$$

Onde:  $s_i$  é o limite superior. Esta notação assume que cada  $x_i$  está sujeito a um limite superior finito.

O problema de otimização (4.8.2) pode ser facilmente convertido à usual forma padrão pela introdução de variáveis de folga  $y_i$  para cada restrição com limitação superior ([5]):

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad C^t \underline{X} \\ \text{sujeito} \quad & A \underline{X} = \underline{b} \\ & \underline{X} + \underline{Y} = \underline{S} \\ & e \quad x_i \geq 0, \quad y_i \geq 0 \quad i=1,2,\dots,m \end{aligned} \quad (4.8.3)$$

Esta forma aumenta consideravelmente o número de variáveis do quadro da programação linear, que torna penosa sua utilização. Felizmente o método Simplex para solução do problema da programação linear, permite que se utilize de artifícios para este fim sem incorrer num aumento explícito na dimensão do problema ([5]).

A solução do problema de otimização será dada em função das variáveis  $\Delta P_{Gi}^+$ ,  $\Delta P_{Gi}^-$  e  $\Delta P_{Li}$ , então deve-se convertê-las às variáveis originais utilizando (4.7.2) e (4.7.6).

#### 4.9 - Conclusão

Neste capítulo foi formulado a solução do problema de eliminação de sobrecargas através de programação linear, tal que se minimize uma função objetivo construída com bases nas penalidades de custos referente às máquinas e cargas do sistema. Isto é feito através de vários segmentos linearizados, de maneira que se minimize o desvio do estado nominal de geração e o corte de carga sujeito às restrições de estabilidade transitória (com objetivo de se eliminar as sobrecargas considerando a estabilidade transitória do sistema), potência das máquinas, cargas, balanço de potência e transmissão.

Foram introduzidas considerações sobre as penalidades das cargas para permitir a utilização da realocação de geração como prioridade de solução. Se isto não for suficiente utiliza-se, como último recurso, o alívio de carga.

Todas as variáveis envolvidas são tomadas como in

crementos nas injeções do sistema.

Foi abordado o método de solução da programação linear utilizando o quadro do simplex e interpretação do resultado obtido.

No próximo capítulo, serão efetuados alguns exemplos de utilização do método em questão para eliminação de sobrecargas relativa à estabilidade transitória.

## CAPÍTULO V

## EXEMPLOS

Neste capítulo procede-se os testes do algoritmo de eliminação de sobrecargas relativas à estabilidade transitória de um sistema sob contingências. O sistema escolhido é uma adaptação do exemplo apresentado na referência ([29]), com 25 barras, 8 geradores e 31 linhas de transmissão, conforme a configuração i lustrada na figura (5.1) cujos dados se encontram nas tabelas (1), (2) e (3).

BARRA	POT.ATIVA (p.u)	$X'_d$ (p.u)
1	3.293	0.015
2	2.06	0.05
3	0.597	0.01
4	0.8	0.012
5	0.853	0.011
6	1.4	0.065
7	0.876	0.07
8	REFERÊNCIA	0.035

Tabela 1 - Dados dos geradores

BARRA	POT.ATIVA (p.u)	POT.REATIVA (p.u)
9	1.04	0.145
10	0.	0.
11	1.766	0.618
12	0.585	0.02
13	0.78	0.018
14	0.628	0.05
15	1.756	0.1
16	1.32	0.2
17	0.131	0.13
18	0.	0.
19	0.	0.
20	0.	0.
21	0.83	0.014
22	0.	0.
23	0.	0.
24	0.	0.
25	2.25	0.09

Tabela. 2 - Dados de cargas

LINHA	BARRA INICIAL	BARRA TERM.	R(p.u)	X(p.u)	B(p.u)
1	1	18	0.	0.0217	0.
2	2	19	0.	0.0539	0.
3	3	20	0.	0.0184	0.
4	4	21	0.	0.0121	0.
5	5	22	0.	0.0133	0.
6	6	23	0.	0.0702	0.
7	7	24	0.	0.0834	0.
8	8	25	0.	0.045	0.
9	18	23	0.018	0.1443	0.08
10	11	18	0.0226	0.1623	0.1
11	18	19	0.007	0.0529	0.2
12	19	20	0.0148	0.0802	0.13
13	9	19	0.0260	0.1770	0.07
14	9	10	0.0120	0.0903	0.115
15	10	11	0.0068	0.0535	0.18
16	11	20	0.0181	0.1465	0.12
17	11	21	0.0152	0.1153	0.144
18	12	21	0.0082	0.0479	0.25
19	12	13	0.0111	0.0848	0.17
20	13	14	0.0068	0.0382	0.22
21	14	15	0.0076	0.0784	0.135
22	14	16	0.0094	0.0507	0.17
23	11	22	0.0118	0.127	0.14
24	22	23	0.0075	0.0541	0.21
25	23	24	0.0138	0.1011	0.108
26	17	24	0.0166	0.1029	0.105
27	16	23	0.0017	0.1559	0.08
28	23	25	0.0124	0.1198	0.123
29	16	25	0.0174	0.1443	0.145
30	17	25	0.011	0.1038	0.2
31	15	25	0.0151	0.1348	0.18

Tabela 3 - Dados do sistema de transmissão

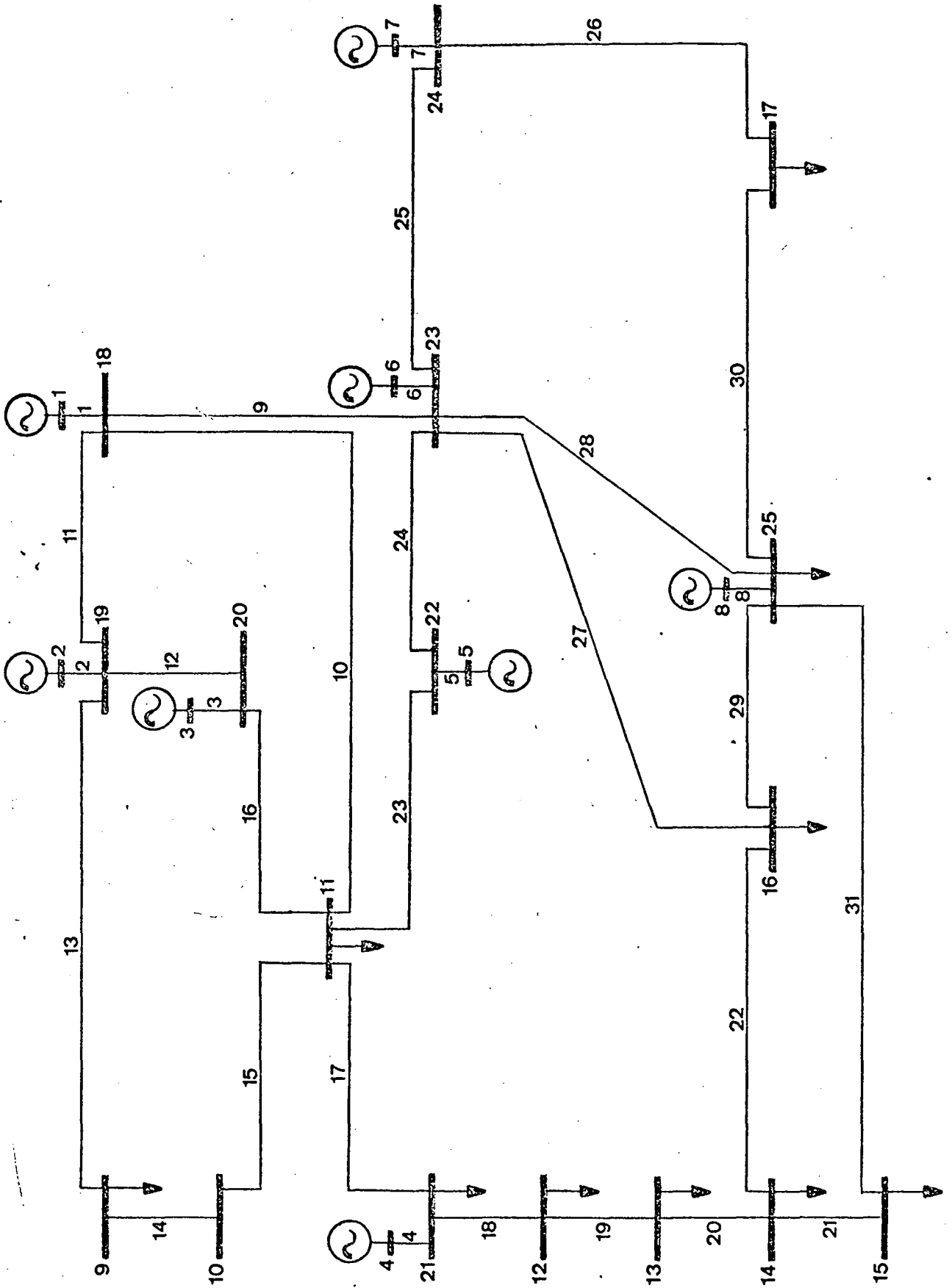


Figura 5.1 - Sistema de Potência em Estudo.

Foram feitas diversas contingências de retirada de linhas neste sistema para identificar quais configurações que a apresenta sobrecarga. Dentre elas apenas a retirada de operação da linha 17 entre as barras 11 e 21 se encontra em sobrecarga, omite-se aqui os resultados das outras contingências por não apresentarem interesse neste estudo.

A seguir são feitos quatro testes no sistema em estudo, em função de combinações dos custos de geração e das penalidades das cargas com o propósito de se mostrar, que dependendo destas penalidades, encontra-se diferentes alternativas viáveis para a eliminação de sobrecargas.

O resultado destes testes são feitos da seguinte maneira: A restrição de estabilidade é tomada apenas como posicionamento da energia em relação ao domínio de estabilidade, isto é , se o sistema apresenta sobrecarga para uma determinada contigência, a etapa seguinte é encontrar uma alternativa afim de atingir-se o valor desejado no índice de estabilidade. O passo do índice de estabilidade é um parâmetro que determina o novo índice de estabilidade, desta forma pode-se tomá-lo em várias etapas até atingir o almejado, dependendo da conveniência.

O cálculo do fluxo de potência é obtido através do modelo AC. Será adotado o método Simplex (grande M) para a solução do problema da programação linear.

Eventualmente quando houver necessidade de corte de carga ativa no sistema, conforme o proposto neste trabalho, lembra-se neste caso que existe dependência entre a carga ativa e reativa em cada barra. Desta forma, deve-se introduzir um critério para determinação do corte de carga reativa em função do corte de

ativa. Isto pode ser feito da seguinte maneira ([29]):

$$\Delta Q_{Li} = \frac{Q_i^0}{P_i^0} \cdot \Delta P_{Li} \quad (5.1)$$

onde  $\Delta Q_{Li}$  é o corte de carga reativa na  $i$ -ésima barra, se existir corte de carga ativa,  $P_i^0$  e  $Q_i^0$  carga ativa e reativa na  $i$ -ésima barra do sistema respectivamente.

#### - 1º Teste exemplo

Os resultados deste teste está listado a seguir, em forma de tabela, mostrando apenas os ângulos de máquinas, omitindo-se as tensões das barras restantes. O primeiro bloco da tabela de resultados é referente ao estado nominal do sistema e o segundo é obtido a partir da realocação de geração e do alívio de carga. A coluna erro/100 desta tabela significa o erro introduzido no índice de estabilidade através da comparação entre o obtido pelo algoritmo e o valor que se deseja, afim de se mostrar a influência da linearização.

Assim para este exemplo tem-se o seguinte resultado:

ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA  
 ELIMINAÇÃO DE SOBRECARGAS ATRAVÉS DA REALOCAÇÃO DE GERAÇÃO E  
 ALÍVIO DE CARGA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR

K-----K NO. BARRAS = 25  
 NO. BARRAS DE GERAÇÃO = 8  
 BARRA DE FOLGA = 0  
 NO. DE LINHAS = 31  
 NO. MAX. ILL. ACRES. POT. 1 = 20  
 TOLERÂNCIA 115,23% POT. 1 = 0,0100  
 ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE ALÍVIO = 0,7000  
 PASSO-ÍNDICE DE ESTABILIDADE = 1,0000

BARRA	X----	CARGA	-----	PENAL. F.O
		ATIVA	REATIVA	
1	0	1,04000	0,14000	50,0000
2	0	0,76000	0,01000	50,0000
3	0	0,58000	0,02000	50,0000
4	0	0,78000	0,01000	50,0000
5	0	0,62000	0,05000	50,0000
6	0	1,75000	0,10000	50,0000
7	0	1,32000	0,20000	50,0000
8	0	0,13100	0,13000	50,0000
9	0	0,0	0,0	=
10	0	0,0	0,0	=
11	0	0,0	0,0	=
12	0	0,0	0,0	=
13	0	0,0	0,0	=
14	0	0,0	0,0	=
15	0	0,0	0,0	=
16	0	0,0	0,0	=
17	0	0,0	0,0	=
18	0	0,0	0,0	=
19	0	0,0	0,0	=
20	0	0,0	0,0	=
21	0	0,0	0,0	=
22	0	0,0	0,0	=
23	0	0,0	0,0	=
24	0	0,0	0,0	=
25	0	2,25000	0,09000	50,0000

BARRA	LIMITES DE GERAÇÃO	PENALIDADES	F. OBJETIVO
	X-PHAX-K	X-PMIN-X	DECRESCIMO
1	3,400000	2,364999	1,000000
2	2,299999	1,599999	1,000000
3	0,900000	0,400000	1,000000
4	1,250000	0,450000	1,000000
5	2,050000	0,600000	1,000000
6	2,250000	0,650000	1,000000
7	2,554999	0,800000	1,000000

RETIRODA DA LTMA 17. ADM. SERIE = 1,12000 -0,52350, ADM. SHUNT = 0,3 0,14400

BARRA	GERAÇÃO	ALFA PRE-FALTA (RADIANOS)	ALFA POS-FALTA (RADIANOS)	TAJGENCIA (RADIANOS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	ÍNDICE DE SEGURANCE	ÍNDICE DE ESTAB.	ERRO/100	K	P
1	3,29300	0,49507	0,63530	0,14328	0,30798	0,22509	-0,60625	1,60625	0,0	2	4
2	0,52000	0,26141	0,75405	0,20509							
3	0,55000	-0,10970	-0,53427	-0,15046							
4	0,35000	0,13067	0,24721	0,17623							
5	0,40000	0,27805	0,34351	0,05766							
6	0,87000	0,20505	0,24508	0,03995							
7	3,29300	0,66163	0,62530	0,21114	0,30683	0,49306	0,31771	0,62229	11,10106	2	4
8	0,33000	0,52101	0,67121	0,31562							
9	0,54700	0,29101	0,48721	0,23147							
10	0,32400	-0,17535	-0,53732	-0,09711							
11	0,55000	0,13709	0,24066	0,11266							
12	1,43000	0,28366	0,34342	0,03393							
13	0,87000	0,21077	0,25268	0,05746							

\*\*\* POTENCIA NA BARRA DE FOLGA = 1,5577

BARRA	X--	ALÍVIO DE CARGA	-----	CARGA FINAL	-----
		ATIVA	REATIVA	ATIVA	REATIVA
1	0	0,0	0,0	1,04000	0,14000
2	0	0,0	0,0	0,76000	0,01000
3	0	0,0	0,0	0,58000	0,02000
4	0	0,0	0,0	0,78000	0,01000
5	0	0,0	0,0	0,62000	0,05000
6	0	0,0	0,0	1,75000	0,10000
7	0	0,0	0,0	1,32000	0,20000
8	0	0,0	0,0	0,13100	0,13000
9	0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0	0,0	0,0	2,25000	0,09000

Neste teste foi atingido o objetivo com um aumento no domínio de estabilidade de 115,23% e um decréscimo na energia inicial de 16,62% resultando num erro no índice de estabilidade de 11,10%. Não houve alívio de cargas. Teve-se um decréscimo de potência no gerador da barra 2 de 0,2291 e um acréscimo no gera

dor 4 e 0.2241.

- 2º Teste exemplo

Neste caso, supondo que as penalidades dos geradores 2 e 4 sejam mais altos que os demais, enquanto as das cargas permanecem as mesmas, assim tem-se:

\*\*\*\*\* ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITORIA \*\*\*\*\*

ELIMINACAO DE SOBRCARGAS ATRAVES DA REALOCAÇÃO DE GERACAO E ALIVIO DE CARGA UTILIZANDO PROGRAMACAO LINEAR

X-----X NO. BARRAS = 25  
 NO. BARRAS DE GERACAO = 8  
 BARRA DE FOLGA = 8  
 NO. DE LIMES = 31  
 NO. MAX. ITERACOES (F. POT.) = 20  
 TOLERANCIA (F. POT.) = 0.0100  
 INDICE DE ESTABILIDADE DESEJADO = 0.7000  
 PASSO-INDICE DE ESTABILIDADE = 1.0000

BARRA	X-----	CARGA	-----X	PENAL. F.O
		ATIVA	RELATIVA	
9		1.04000	0.14900	50.0000
10		0.0	0.0	-
11		1.75600	0.51800	50.0000
12		0.52000	0.07000	50.0000
13		0.78000	0.01800	50.0000
14		0.62500	0.05000	50.0000
15		1.75600	0.16000	50.0000
16		1.32000	0.20000	50.0000
17		0.13100	0.13000	50.0000
18		0.0	0.0	-
19		0.0	0.0	-
20		0.0	0.0	-
21		0.83000	0.01400	50.0000
22		0.0	0.0	-
23		0.0	0.0	-
24		0.0	0.0	-
25		2.25000	0.34000	50.0000

BARRA	LIMITES DE GERACAO	PENALIDADES	F. OBJETIVO
	X-PMAX-X	X-PMIN-X	ACRESCIMO
1	3.400000	2.849999	1.000000
2	3.299999	1.599999	20.000000
3	0.900000	0.400000	1.000000
4	1.150000	0.550000	20.000000
5	1.200000	0.500000	1.000000
6	1.200000	0.500000	1.000000
7	1.555955	0.800000	1.000000

RETIRADA DA LINHA 17, ADM. SERIE = 1.12000 -8.52350, ADM. SHJNT = 0.0 0.14400

BARRA	GERACAO	ALFA PPE-FALTA (RADIANOS)	ALFA PSS-FALTA (RADIANOS)	TANGENCIA # 2 (RADIANOS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL Q. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCE	INDICE DE ESTAB.	ERRO/100	K	P
1	3.29300	0.46507	0.63939	0.14328	0.36798	0.22509	-0.60625	1.60625	0.0	2	4
2	2.06000	0.56141	0.75405	0.26509							
3	0.59700	0.29503	0.50427	0.15634							
4	0.80000	-0.10977	-0.52234	-0.32372							
5	0.95300	0.13067	0.27721	0.07623							
6	1.40000	0.27845	0.34351	0.05663							
7	0.37600	0.20505	0.24508	0.03955							
8	2.95000	0.39477	0.55527	0.19768	0.29578	0.45486	0.34974	0.65026	7.10543	2	4
9	2.05000	0.50767	0.68488	0.37548							
10	0.40000	0.23295	0.42459	0.21745							
11	0.92303	-0.11475	-0.47304	-0.45028							
12	0.64096	0.10580	0.21506	0.10566							
13	1.40000	0.27564	0.33974	0.07998							
14	1.50000	0.37698	0.41825	0.06153							

\*\*\* POTENCIA NA BARRA DE FOLGA = 1.5468

BARRA	X-ALIVIO DE CARGA	X-ALIVIO DE CARGA	X-ALIVIO DE CARGA	X-ALIVIO DE CARGA
	ATIVA	RELATIVA	ATIVA	RELATIVA
9	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0

Novamente não houve corte de carga, mas a realoção de geração foi mais penosa que o caso anterior, ou seja, a crêscimos de geração nas barras 4 e 7 de 0.1230 e 0.7240 e um de crêscimo nas barras 1, 3 e 5 de 0.443, 0.1970 e 0.2120 respectivamente. Houve um aumento no domínio de 98.55%, uma diminuição na energia inicial de 19.62% e um erro no índice de estabilidade de 7.10%.

< 3º Teste exemplo

Mudando-se as penalidades para que haja o alívio de carga, tem-se os seguintes resultados:

\*\*\*\*\* ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITORIA \*\*\*\*\*

ELIMINACAO DE SOBRECARGAS ATRAVES DA REALOCAÇÃO DE GERACAO E ALIVIO DE CARGA UTILIZANDO PROGRAMACAO LINEAR

X-----X NO. BARRAS = 25  
 NO. BARRAS DE GERACAO = 8  
 BARRA DE TOLGA = 8  
 NO. DE LINHAS = 31  
 NO. MAX. ITERACOES (F. POT.) = 20  
 TOLERANCIA (F. POT.) = 0.010  
 INDICE DE ESTABILIDADE DE SFJAO = 0.700  
 PASSO-INDICE DE ESTABILIDADE = 1.0000

BARRA	X----	CARGA	----	X	PENAL. F.O
	ATIVA			PFATIVA	
9	1.04000			0.14500	1.0000
10	0.0			0.0	-
11	1.76600			0.31800	1.0000
12	0.55500			0.32600	1.0000
13	0.76000			0.11000	1.0000
14	0.62800			0.35000	1.0000
15	1.75600			0.16000	1.0000
16	1.32000			0.20000	1.0000
17	0.13100			0.13000	1.0000
18	0.0			0.0	-
19	0.0			0.0	-
20	0.0			0.0	-
21	0.83000			0.21400	1.0000
22	0.0			0.0	-
23	0.0			0.0	-
24	0.0			0.0	-
25	2.25000			0.39000	1.0000

BARRA	LIMITES DE GERACAO	PENALIDADES	F.OBJETIVO
	X-PMAX-X	X-PMIN-X	ACRESCIMO
1	3.400000	2.245559	20.000000
2	2.239999	1.599999	20.000000
3	0.900000	0.400000	20.000000
4	1.150000	0.550000	20.000000
5	1.200000	0.550000	20.000000
6	1.200000	0.550000	20.000000
7	1.565559	0.300000	20.000000

RETIRADA DA LINHA 17, ADM. SERIE \* 1.12030 -0.52350, ADM. SHUNT = 0.0 0.14430

BARRA	GERACAO	ALFA PRE-FALTA (RADIANS)	ALFA POS-ALTA (RADIANS)	TANGENCIA P 2 (RADIANS)	ENERGIA POTENCIAL INICIAL	ENERGIA POTENCIAL D. ESTAB.	INDICE DE SEGURANCA	INDICE DE ESTAB.	ERRO/100	A	P
1	3.23300	0.46507	0.63939	0.14328	0.36798	0.22909	-0.60625	1.60625	0.0	2	4
2	3.23300	0.56141	0.75405	0.26509							
3	0.59700	0.29503	0.50429	0.15634							
4	0.30000	-0.10973	-0.52234	-0.32372							
5	0.35300	0.13067	0.24721	0.37623							
6	1.40000	0.27845	0.34351	0.35766							
7	0.87600	0.20505	0.24503	0.33955							
8	3.23300	0.46134	0.52454	0.23954	0.30437	0.48721	0.37528	0.62472	10.75404	2	4
9	1.32515	0.52594	0.70583	0.39331							
10	0.59700	0.29162	0.48643	0.23091							
11	0.80000	-0.35023	-0.44078	-0.45537							
12	0.35300	0.13703	0.24333	0.11135							
13	1.45000	0.28363	0.34822	0.33338							
14	0.37600	0.21075	0.25257	0.35716							

\*\*\* POTENCIA NA BARRA DE FOLGA = 1.5571

BARRA	X-ALIVIO DE ATIVA	CARGA-X RELATIVA	X- CARGA ATIVA	FINAL RELATIVA
9	0.0	0.0	1.0400	0.1450
10	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	1.7650	0.3183
12	0.0	0.0	0.5800	0.0203
13	0.0	0.0	0.7800	0.0160
14	0.0	0.0	0.6200	0.3500
15	0.0	0.0	1.7500	0.1000
16	0.0	0.0	1.3200	0.2000
17	0.0	0.0	0.1500	0.1300
18	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.2298	0.3339	0.6002	0.1101
22	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	2.2500	0.0900

A melhor alternativa foi um corte de carga de 0.2298 na barra 21 e um decréscimo no gerador da barra 2 de 0.2348, em consequência houve um aumento no domínio de estabilidade de 112,67%, uma diminuição na energia potencial inicial de 17,29% e um erro introduzido no índice de estabilidade de 10,75%.

- 4º Teste exemplo

Supondo neste exemplo que seja o mesmo que o caso anterior, apenas que a carga da barra 21 não pode ser cortada devido a sua importância no momento.

ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

ELIMINACAO DE SOBRECARGAS ATRAVES DA REALOCAO DE GERACAO E ALIVIO DE CARGA UTILIZANDO PROGRAMACAO LINEAR

X-----X NO. BARRAS = 25  
 NO. BARRAS DE GERACAO = 8  
 BARRAS DE FOLGA = 8  
 NO. DE LINHAS = 31  
 NO. MAX. ITERACOES DE POT. = 20  
 TOL. MAX. DE POT. = 0,3100  
 INDICE DE ESTABILIDADE DE FOLGA = 0,7000  
 PASSO-INDICE DE ESTABILIDADE = 1,0000

BARRA	X----	CARGA	-----X	PENAL. F.O
		ATIVA	REATIVA	
9	1,04000	0,14500		1,00000
10	0,0	0,0		
11	1,75600	0,61800		1,00000
12	0,53500	0,32000		1,00000
13	0,75000	0,31800		1,00000
14	0,62800	0,35000		1,00000
15	1,75600	0,16000		1,00000
16	1,32000	0,20000		1,00000
17	0,13100	0,13000		1,00000
18	0,0	0,0		
19	0,0	0,0		
20	0,0	0,0		
21	0,33000	0,01400		50,00000
22	0,0	0,0		
23	0,0	0,0		
24	0,0	0,0		
25	2,25000	0,09000		1,00000

BARRA	LIMITES DE GERACAO	PENALIDADES	F. OBJETIVO
	X-PMAX-X	X-PMIN-X	ACRESCIMO
1	3,400000	2,349999	20,000000
2	2,297999	1,599999	20,000000
3	0,500000	0,400000	20,000000
4	1,150000	0,500000	20,000000
5	1,250000	0,500000	20,000000
6	1,200000	0,500000	20,000000
7	1,599999	0,300000	20,000000

RETIRADA DA LINHA 17, ADM. SERIE = 1.12000 -8.52350, ADM. SHUNT = 0,0 0.14400

BARRA	GERACAO	ALFA	BETA	TANGENCIA	ENERGIA	ENERGIA	INDICE DE	INDICE DE	ERRD/100	K	P
X----	X-----X	PRF-FALTA	POS-FALTA	GRADIANS	POTENCIAL	POTENCIAL	SEGURANCA	ESTAB.	X-----X	X-----X	X-----X
1	3,29300	0,46507	0,63939	0,14328	0,36798	0,22909	-0,50625	1,50625	0,0	2	4
2	2,06000	0,56141	0,75409	0,26509							
3	0,59700	0,29503	0,50429	0,15634							
4	0,90000	-0,10973	-0,52234	-0,32323							
5	0,85300	0,13667	0,24721	0,07623							
6	1,00000	0,27845	0,34351	0,05766							
7	0,37600	0,20505	0,24503	0,03755							
1	3,29300	0,45767	0,62075	0,21179	0,30389	0,49723	0,39983	0,61117	12,69010	2	4
2	1,97719	0,51821	0,57204	0,37681							
3	0,59700	0,28747	0,48224	0,23220							
4	0,80000	-0,38345	-0,44376	-0,45114							
5	0,35300	0,13552	0,24673	0,11245							
6	1,40000	0,28257	0,34705	0,03420							
7	0,97600	0,21027	0,25200	0,05774							

\*\*\* POTENCIA NA BARRA DE FOLGA = 1.5486

BARRA	X-ALIVIO DE CARGA-X	X-- CARGA FINAL --X
	ATIVA	REATIVA
9	0,0	0,0
10	0,0	0,0
11	0,0	1,75600
12	0,2578	0,3272
13	0,0	0,75000
14	0,0	0,62800
15	0,0	1,75600
16	0,0	1,32000
17	0,0	0,13100
18	0,0	0,0
19	0,0	0,0
20	0,0	0,0
21	0,0	0,33000
22	0,0	0,0
23	0,0	0,0
24	0,0	0,0
25	0,0	2,25000

Assim, houve um alívio de carga na barra 12 de 0.2578 e um decréscimo na geração da barra 2 de 0.2628, resultando num aumento no domínio de 117,04% e uma diminuição na energia inicial de 17,42% que produziram um erro no índice de estabilidade de 12,69%.

## C A P Í T U L O VI

## CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E SUGESTÕES

Foi desenvolvido neste trabalho um procedimento para eliminação de sobrecargas detectadas a partir da análise da estabilidade transitória dos sistemas de potência.

Os estudos da estabilidade transitória são feitos utilizando domínios de estabilidade dados pelo segundo método de Liapunov e obtidos através do método das tangências. Com relação a este método de determinação de domínios foi proposto uma heurística de orientação de busca com o objetivo de se limitar os limites inferiores. A característica destes limites selecionados permite que se encontre com segurança o domínio de estabilidade, diminuindo consideravelmente o tempo de processamento.

O método de eliminação de sobrecargas foi baseado na mudança do estado de equilíbrio do sistema, utilizando a realocação de geração e como último recurso, o alívio de carga. Este programa foi formulado através de técnicas de programação linear, minimizando o desvio relação aos níveis de geração e minimizando o corte de carga, se necessário, em função dos custos de geração e das prioridades das cargas, isto é, existem cargas que eventualmente devam ser atendidas em sua totalidade, devido a importância que representam.

Observou-se que no problema de otimização qualquer que sejam as penalidades impostas, encontrou-se uma solução viável, rápida e segura. Isto permite sua utilização em tempo real.

Em todas as simulações feitas, incluindo outras não apresentada neste trabalho, pode-se eliminar as sobrecargas sem passos intermediários, isto é, de forma direta, embora sujeito a um maior erro quanto maior for o esforço para eliminá-las. Este erro como era de se esperar, é introduzido pela linearização da função de Liapunov, bem como outras linearizações envolvidas. Convém frisar que este erro está sempre a favor da segurança devido à característica da função de Liapunov.

Um fato importante que se deve salientar, é quanto à face onde ocorre a tangência que especifica o domínio de estabilidade, que não altera em função da mudança nas injeções do sistema, Isto porque esta face depende essencialmente dos parâmetros das linhas de transmissão e da topologia do sistema. Diante deste fato e de que o erro no índice de estabilidade está do lado da segurança, permite que se elimine qualquer sobrecarga em apenas uma etapa. Com isto não se precisa que se determine o domínio de estabilidade mais de uma vez.

O estudo deste trabalho restringiu-se à contingências do tipo retirada de linhas de operação. Quando o programa se tratar de curto-circuito, este envolve maiores complicações, pois o estado referente à retirada do defeito, correspondente à energia inicial, é obtido através da solução das equações diferenciais de oscilação do sistema, em função do tempo de retirada do defeito. Isto dificulta o envolvimento da mudança na energia potencial inicial e a energia do domínio de estabilidade, como proposto neste trabalho. Por isso propõe-se, neste caso, que se utilize o mesmo procedimento, apenas levando em consideração o domínio de estabilidade, expandindo-o de tal forma que envolva a condição i

nicial, suposta inicialmente fixa e assim com certeza a nova energia potencial inicial resultante será menor que a anterior, o que garantirá segurança. Isto porque o fato de se aumentar o domínio de estabilidade implica na diminuição da energia potencial inicial, embora em menor proporção.

Como sugestão para prosseguimento deste trabalho pode-se considerar que este algoritmo seja aumentado sua eficiência, explorando-se melhor os métodos de cálculo e os recursos de programação.

Além disso foi considerada contingências do tipo retirada de linha de operação. Pode-se investigar a inclusão de contingências, como curto-circuito, por exemplo, conforme exposto anterior.

Por fim, no caso de uma análise de contingências, pode-se incluir restrições que levam em conta para a consideração da influência de todas as sobrecargas, sobre a realocação de geração. Assim, viabilizar a operação de modo que o sistema suporte qualquer contingência considerada.

## B I B L I O G R A F I A

- [1] - KIMBARK, E.W. - "Power System Stability" - Vol. I e II ,  
New York, John Wiley and Sons, Inc., 1948.
- [2] - STAGG, G.W. and EL-ABIAD, A.H. - "Computer Methods in  
Power Systems Analysis" - New York, McGraw-Hill, 1968.
- [3] - G.KRON, DIAKOPTICS - "The Piecewise Solution of Large-Sca  
le Systems", MacDonalD, London, 1963.
- [4] - On-Line Stability Analysis Study RP90-1, for the Edison  
Eletric Institute by the North American Rockwell Infor  
mation Systems Company, 1970.
- [5] - LUENBERGER, D.G. - "Introduction to Linear and Nonlinear  
Programming", Addison-Wesley Publishing Company, Inc -  
USA, 1973.
- [6] - CRARY, S.B. - "Power Systems Stability" - Vol. I, New York,  
John Wiley and Sons, Inc., 1955.
- [7] - TALUKDAR, S.N. - "Iterative Multistep Methods for Transient  
Stability Studies" - IEEE Trans. PAS., Vol. 90, n° 1,  
January/February 1971, pg. 96 a 102.
- [8] - STANTON, K.N. and TALUKDAR, S.M. - "New Interation  
Algoritms for Transient Stability Studies" - IEEE  
Trans. PAS, Vol. 89, n° 5/6, May/June, 1970, pg.985-991.

- [9] - ADIBI, M.M.; HIRSCH, P.M. and JORDAN, J.A. - "Solution Methods for Transient and Dynamics Stability" - IEEE Proc., Vol. 62, n<sup>o</sup> 7, July 1974, pg. 951 a 958.
- [10] - EL-ABIAD, A.H. and PRABHAKARA, F.S. - "A Simplified Determination of Transient Stability Regions for Liapunov Methods" - IEEE Trans. PAS., Vol. 94, n<sup>o</sup> 2, March/April 1975, pg. 672 a 689.
- [11] - GLESS, G.E. - "The Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability" - IEEE Trans. PAS., Vol. 85, n<sup>o</sup> 2, February 1966, pg. 159 a 168.
- [12] - EL-ABIAD, A.H. and NAGAPPAN, K. - "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems" - IEEE Trans. PAS., Vol. 85, n<sup>o</sup> 2, February 1966, pg. 169 a 179.
- [13] - FALLSIDE, F. and PATEL, M.R., - "On the Application of the Liapunov Method to Synchronous Machine Stability" - I.J.C., Vol. 4, n<sup>o</sup> 6, December 1966, pg. 501 a 513.
- [14] - WILLEMS, J.L. - "Improved Liapunov Functions for Transient Power Systems Stability" - IEEE Proc., Vol. 115, n<sup>o</sup> 9, September 1968, pg. 1315 a 1318.
- [15] - WILLEMS, J.L. and WILLEMS, J.C. - "The Applications of Liapunov Methods to the Computation of Transient Stability Regions for Multimachine Power Systems" - IEEE Trans. PAS., Vol. 89, n<sup>o</sup> 5/6, May/June 1970, pg. 795 a 801.

- [16] - RIBBENS-PAVELA, M. - "Transient Stability of Multimachine Power Systems by Liapunov Direct Method" - IEEE , Conference Paper nº 71 CP 17, Jan/Feb. 1971, pg. 1 a 10.
- [17] - LÜDERS. G.A. - "Transient Stability of Multimachine Power Systems via the direct Method of Liapunov" - IEEE Trans. PAS., Vol. 90, nº 1, Jan/Feb. 1971, pg. 23 a 36.
- [18] - WILLEMS, J.L. - "Direct Method for Transient Stability Studies in Power System Analysis" - IEEE Trans. AC, Vol. 16, nº 4, August 1971, pg. 332 a 341.
- [19] - FONSECA, L.G.S. - "Determinação de Domínio de Estabilidade para uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência" - Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Abril 1976.
- [20] - EL-ABIAD, A.H. and GUPTA, C.L. - "Determination of the Closest Unstable Equilibrium State for Liapunov Methods in Transient Stability Studies" - IEEE Trans. PAS., Vol. 95, nº 5, Set/Oct. 1976, pg. 1966 a 1712.
- [21] - FONSECA, L.G.S. and DORAISWAMI, R. - "A Fast and Reliable Determination of Dominion of Transient Stability for Multimachine Power Systems - IEEE Conference paper A77629-9, July 1977.

- [22] - FONSECA, L.G.S., BORENSTEIN, C.R. - "Uso de Domínios de Estabilidade na Análise de Segurança "On-Line" de Sistemas de Potência" - III Congresso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Concepción-Chile, Mayo 1979.
- [23] - COGO, JOÃO, R.- "Determinação de Domínios de Estabilidade para Sistemas de Potências com n-máquinas" - Tese M.Sc. - UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Junho 1977.
- [24] - BORENSTEIN, C.R. - "Planejamento a Curto Prazo do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica em Restrição de Estabilidade Transitória" - Tese M.Sc., UFSC, Florianópolis, 1977
- [25] - WILLEMS, J.L., "A Partial Stability Approach to the Problem of Transient Power System Stability" - I.J.C. , Vol. 19, nº 1, Jan. 1974, pg. 1 a 14.
- [26] - TAVORA, C.J. and SMITH, O.J.M. - "Equilibrium Analysis of Power System" - IEEE Trans. PAS., Vol. 91, nº 3, May/June 1972, pg. 1131 a 1137.
- [27] - PRABHAKARA, F.S.; EL-ABIAD; A.H. and KOIVO, A.J. - "Application of Generalized Zubov's Methods to Power System Stability" - I.J.C., Vol. 20, 1974, pg. 203 - 212.

- [28] - TAVORA, C.J. and SMITH, O.J.M. - "Stability Analysis of Power Systems"- IEEE Trans. PAS., Vol. 91, n<sup>o</sup> 3 , May/June 1972, pg. 1138 - 1144.
- [29] - CHAN, S.M. and SCHWEPPE, F.C. - "A Generation Reallocation and Load Shedding Algorithm" - IEEE Trans. PAS-98, n<sup>o</sup> 1, Jan/Feb. 1979, pg. 26 - 34.
- [30] - STOTT, B and MARINHO, J.L. - "Linear Programming for Power - Systems Network Security Applications" - IEEE Trans., PAS - 98, n<sup>o</sup> 3, May/June 1979, pg. 837 - 848.
- [31] - CHAN, S.M. and YIP, E. - "A Solution of the Transmission Limited Dispatch Problem by Sparse Linear Programming"- IEEE Trans. PAS - 98, n<sup>o</sup> 3, May/June 1979, pg. 1044-1053.
- [32] - SUBRAMANIAN, D.K. - "Optimum load Shedding Through Programming Techniques" - IEEE Trans., PAS-90, n<sup>o</sup> 1, Jan/Feb. 1971, pg. 89 - 95.
- [33] - SCHEN, C.M. and LAUGHTON - "Power-System load Scheduling with Security Constraints Using dual Linear Programming" - IEEE Proc., Vol. 117, n<sup>o</sup> 11, Nov/1970, pg. 2117 - 2127.
- [34] - LUGTU, RENATO - "Security Constrained Dispatch" - IEEE Trans. PAS-98, n<sup>o</sup> 1, Jan/Feb. 1979, pg. 270 - 274.

- [35] - STOTT, B. and HOBSON, ERIC.- "Power Systems Security Control Calculations Using Linear Programming, Part I" - IEEE Trans. PAS-97, n<sup>o</sup> 5, Sept/Oct. 1978, pg. 1713 - 1720.
- [36] - STOTT, B. and HOBSON, ERIC. - "Power System Security Control Calculations Using Linear Programming, Part II". - IEEE Trans., PAS-97, n<sup>o</sup> 5, Sept/Oct. 1978.
- [37] - EJEBE, G.C., PUNTEL, W.R. and WOLLENGERG - "A load Curtailment Algorithm for the Evaluation of Power Transmission System Adequacy", Presented at the IEEE PES Summer Meeting, México City, México, July 1977, Paper A77505-1.
- [38] - KALTENBACH, J.C. and HAJDU, L.P. - "Optimal Corrective Rescheduling for Power Systems Security" - IEEE Trans. PAS, Vol. 90, March/April 1971, pg. 843 - 851.
- [39] - GHONEIM, M.Z.; ASKOURAH, M.A.N., and RAHMAN, S.A. - "Estimation of Optimal load Shedding in Transmission System Using Mathematical Programming Techniques", Presented at the IEEE PES Summer Meeting, México City, México, July 1977, Paper A77595-2.