

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

ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA USANDO O
SEGUNDO MÉTODO DE LIAPUNOV

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

GETULIO BRUM MARQUES

FLORIANÓPOLIS, 12 DE MARÇO DE 1981

Biblioteca Universitária
UFSC

ALGORÍTMO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA USANDO O
SEGUNDO MÉTODO DE LIAPUNOV

GETULIO BRUM MARQUES

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

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

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr.Ing.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:

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

Prof. Alcir Monticelki, D.Sc., L.D.

Prof. Luiz Jairo Franco Machado, Dr.Ing.

Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

À Gisele, Sandra,
Antenor e Teresin
ha: minha filha,
esposa e pais.

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

Em especial ao Prof. Luis Gonzaga de Souza Fonseca pela orientação, dedicação e incentivo dados ao longo do trabalho.

Aos Professores Carlos Raul Borenstein e Rajamani Do raiswami por suas colaborações e incentivos dados.

Aos Engenheiros Cornélio Celso de Brasil Camargo e Luiz Gastão Castro Souza pelo apoio e facilidades concedidas para que este trabalho fosse concluído.

À CNEN e ELETROSUL pelo apoio financeiro.

R E S U M O

Este trabalho tem como objetivo a apresentação de um algoritmo computacional para a análise de estabilidade transitória de sistemas de potência com n-máquinas. São usados domínios de estabilidade obtidos através do segundo método de Liapunov, com auxílio de método do politopo. Neste método é determinada uma região de validade para a função energia, usada como função de Liapunov, e determinada a superfície de nível contida nesta região e que tem interseção não vazia com a sua fronteira.

Para eficiência computacional são usadas as propriedades das parcelas da energia potencial, técnicas de esparsidade, certos valores de energia calculados em pontos da fronteira da região de validade e é proposto um procedimento para a ordenação de casos a serem analisados.

São apresentados fluxogramas das subrotinas desenvolvidas e diversos exemplos para ilustração do algoritmo proposto.

A B S T R A C T

The main objective of this work is an algorithm presentation for transient stability analysis of n-machines power systems. Stability domains are obtained through the Liapunov's second method, using the polytopo's method. In this method a region of validity for energy function, used as Liapunov's function, is determined and obtained the level's surface contained in this region and that intercept the region boundary.

For computational efficiency are used energy potential properties, sparsity techniques, certain values of energy calculated in points of validity region's boundary and is proposed a procedure to order the cases to be analysed.

Fluxograms of subroutines are developed and several illustrative examples are included.

S U M Á R I O

CAPÍTULO I	- INTRODUÇÃO	001
CAPÍTULO II	- ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	004
2.1	- Introdução	004
2.2	- Modelo Matemático do Sistema de Potência	004
2.3	- Conceito de Estabilidade	010
2.4	- Estabilidade em Sistema de Potência	012
2.5	- Determinação do Domínio de Estabilidade	016
2.6	- Método do Ponto de Sela	018
2.7	- Método Aproximado de Prabhakara	020
2.8	- Método do Politopo	023
2.9	- Algoritmo para Obtenção de Domínio de Estabilidade	028
2.10	- Conclusões	030
CAPÍTULO III	- ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	031
3.1	- Introdução	031
3.2	- Análise da Estabilidade em Sistemas de Potência .	031
3.3	- Situação Antes do Defeito	034
3.4	- Situação Durante o Defeito	040
3.5	- Situação Pós-Defeito,	043
3.6	- Verificação da Estabilidade Transitória	044
3.7	- Uso do Jacobiano Constante no Problema de Tangên- cia	048
3.8	- Limites Inferiores	053
3.9	- Regra de Parada	057
3.10	- Descrição do Algoritmo	060

3.11 - Processamento de Várias Contingência	064
3.11.1 - Otimização do Uso da Integração Numérica	065
3.11.2 - Otimização do Uso do Domínio de Estabili <u>dad</u> dade	068
3.11.3 - Sistema Controlador	073
3.12 - Conclusões	079
CAPÍTULO IV - EXEMPLOS	080
4.1 - Introdução	080
4.2 - Exemplo 1	080
4.3 - Exemplo 2	088
4.4 - Exemplo 3	091
4.5 - Conclusões	100
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
5.1 - Conclusões e Recomendações	101
BIBLIOGRAFIA	105
ANEXO A	108

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

O constante aumento do consumo de energia elétrica implica no aumento do porte dos sistemas de potência que devem atender os consumidores com continuidade e qualidade de serviço. Para isto devem operar com segurança, mesmo em presença de perturbações como perda de carga, perda de geração ou perda de equipamentos como linhas e transformadores.

Desse modo, se um sistema está operando em um determinado ponto, é importante saber, havendo alguma alteração nas condições de operação,

- se existe um novo ponto de operação,
- se o novo ponto de operação é estável,
- e, se o novo ponto de operação é alcançável a partir do estado do sistema no instante que cessa a perturbação.

Esta última questão decorre do fato das equações que descrevem o sistema serem, mesmo na sua representação mais simples, não lineares. Neste caso, conforme o "distanciamento" do estado quando cessa a perturbação, o novo equilíbrio pode não ser alcançável.

Esta questão tem sido analisada com auxílio de métodos de integração numérica de equações diferenciais e a esta

bilidade do sistema é decidida, para uma certa contingência com um determinado tempo de duração, através da análise da solução das equações diferenciais.

A principal vantagem deste procedimento reside no fato de ser possível representar-se o sistema com grau de detalhe variável. No entanto cada situação diferente deve ser analisada por vez, exige análise das curvas solução e apresenta um consumo de tempo em computador crescente com a complexidade do modelo.

Na busca de métodos mais eficientes e que pudessem concluir automaticamente pela estabilidade ou não, tem-se feito uso dos métodos diretos de análise de estabilidade, principalmente do segundo método de Liapunov.

A procura de funções de Liapunov tem sido intensa e várias funções são hoje disponíveis. Entre estas, a função tipo energia tem recebido atenção, principalmente pelo fato de ser possível a obtenção de domínios de estabilidade com seu auxílio. Estes domínios são especificados pelo ponto de equilíbrio instável do sistema com menor energia potencial [2,3,13a15]. Apesar de ser um procedimento possível, há algumas dificuldades presentes nesta abordagem, tendo em vista a dificuldade de se obter um método geral eficiente que indique o ponto instável mencionado. Não há também uma regra conhecida que determine o número total de pontos de equilíbrio do sistema, não se sabendo então, se todos os pontos instáveis foram encontrados para que, entre estes, se descubra aquele com menor energia potencial.

Para contornar estes problemas, em [4,6] foi proposto um algoritmo que também se baseia na função energia e que utiliza uma região onde a energia tem um comportamento radialmente crescente. Neste procedimento, se certas condições são satisfeitas, um domínio de estabilidade é encontrado conforme sugerido pelo algoritmo.

Partindo da necessidade de se ter procedimentos rápidos para análise da estabilidade transitória, neste trabalho faz-se uso das propriedades das relações matemáticas e da interpretação física de alguns termos envolvidos nas equações, para a proposição de um algoritmo computacional para sistemas de grande porte, com o objetivo de analisar a estabilidade transitória de sistemas de potência.

Assim, no capítulo II, é apresentado o modelo matemático do sistema considerado, a conceituação de equilíbrio e estabilidade, métodos de análise da estabilidade e obtenção de domínios de estabilidade. No capítulo III é discutida a análise da estabilidade em sistemas de potência e proposto um procedimento computacional para isto. Diversos exemplos ilustrativos são dados no capítulo IV de modo a ilustrar o algoritmo proposto. Alguns comentários finais e recomendações são incluídos no capítulo V.

C A P Í T U L O I I

ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução

Neste capítulo serão apresentados o modelo matemático do sistema de potência, conceitos de estabilidade e domínios de estabilidade utilizando-se o segundo método de Liapunov. Também serão discutidos alguns procedimentos para obtenção de domínios de estabilidade baseados no uso da função energia como função de Liapunov.

2.2 - Modelo Matemático do Sistema de Potência

Neste trabalho, será usado o modelo clássico para a representação da máquina, com as seguintes hipóteses:

- A máquina síncrona é representada por uma fonte de tensão constante em série com sua reatância transitória de eixo direto;

A potência mecânica é considerada constante durante o período transitório, já que a ação dos reguladores de velocidade

de, no período de estudo considerado, não se faz sentir em virtude de sua constante de tempo grande em relação ao período de tempo considerado;

- As máquinas síncronas são consideradas como de rotor liso e a constante de inércia é assumida como constante;

- As potências de amortecimento são proporcionais às velocidades de escorregamento, e as constantes de amortecimento das máquinas são supostas constantes;

- As cargas conectadas ao sistema são representadas por admitâncias constantes;

- Os capacitores e reatores ligados ao sistema, são também representados por admitâncias constantes,

Devido às duas últimas considerações o sistema pode ser reduzido às suas barras internas de geração, através de uma redução de Kron por exemplo. Desta maneira o sistema pode ser descrito pelas equações de oscilação de suas máquinas, a seguir ([1,2,3]):

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i}{dt} + P_{e,i} - P_{m,i} = 0 \quad (2.1)$$

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

onde:

t = tempo (segundos),

δ_i = ângulo em graus elétricos entre o eixo do rotor da i-ésima máquina e um eixo girando a uma velocidade de referência,

d_i = coeficiente de amortecimento da i-ésima máquina
(p.u) . (seg)

Pm_i = potência mecânica de entrada para a i-ésima máquina
p.u.

Pe_i = potência elétrica entregue pela i-ésima máquina
(p.u) , dada por:

$$Pe_i = G_{ii}E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [E_i E_j] B_{ij} \text{sen} (\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)$$

$$M_i = \pi f/H_i \quad , \quad H_i = \text{constante de inércia em } \frac{M_{ws}}{MVA} \quad (2.2)$$

onde:

E_i = tensão na barra interna da i-ésima máquina em p.u.

G_{ii} = carga equivalente na i-ésima barra de geração em p.u.

B_{ij} = susceptância de transferência entre a barra interna da i-ésima e da j-ésima máquina em p.u.

G_{ij} = Condutância de transferência entre a barra interna da i-ésima e da j-ésima máquina em p.u.

No algoritmo de obtenção dos domínios de estabilidade são desprezadas as condutâncias de transferências do sistema reduzido, obtendo-se então:

$$P_{ei} = G_{ii}E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [E_i E_j] B_{ij} \text{sen} (\delta_i - \delta_j) \quad (2.3)$$

Define-se, por conveniência,

$$F_{ij} = [E_i E_j] B_{ij} = \text{coeficiente de sincronização,}$$

$$P_i = Pm_i - G_{ii} E_i^2 = \text{injeção na barra } i.$$

Tomando como variáveis de estado δ_i e $\dot{\delta}_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, onde:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \dot{\delta}_i = w_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

\ddot{w}_i = velocidade da i -ésima máquina relativa ao sistema de referência, pode-se escrever as equações (2.1) na forma:

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

$$M_i \dot{w}_i = -d_i w_i + P_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n F_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.4)$$

Para o caso em que não se tem amortecimento uniforme, $\frac{d1}{M1} \neq \frac{d2}{M2} \neq \dots \frac{dn}{Mn}$ são necessárias $(2n-1)$ variáveis de estado. Usa-se fixar um dos ângulos como referência, no caso δ_n , tendo-se então:

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

Com isto, as equações do sistema ficam ([4,5,6])

$$\dot{\alpha} = -M\bar{S}^{-1} R \dot{w} - M\bar{S}^{-1} T^t f(P, F, \alpha) \quad (2.5)$$

$$\dot{\alpha} = T\dot{w}$$

onde:

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} F_{12} \dots F_{1n} & F_{23} \dots F_{n-1, n} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} & & & -1 \\ & & \vdots & \\ & I_{n-1} & \vdots & \\ & & \vdots & \\ & & & -1 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$M_s = d_{\text{diag}} \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_n \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

matriz diagonal

$$R = [r_{ij}] \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \text{ sendo } r_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{se } i \neq j \\ d_i & \text{se } i = j \end{cases}$$

$$f(P, F, \delta) = \begin{bmatrix} f_1(P_1, F, \alpha) \\ \vdots \\ f_{n-1}(P_{n-1}, F, \alpha) \end{bmatrix}$$

onde:

$$f_i(P_i, F, \alpha) = -P_i + \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} \sin(\alpha_i - \alpha_j) + F_{in} \sin(\alpha_i)$$

No caso de amortecimento uniforme ou sem amortecimento, isto é,

$$\frac{d_i}{M_i} = \frac{d_n}{M_n} \quad \text{ou } d_i = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad \text{pode-se definir um cen}$$

tro de ângulos ([7]) δ_0 , onde

$$\delta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

Mostra-se em ([7] , [6]) que neste caso deve-se usar $2n-2$ variáveis de estado e que pode-se definir variáveis θ_i como sendo

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 \quad i = 1, \dots, n$$

tendo-se em vista que:

$$\sum_{i=1}^n M_i \theta_i = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i - \sum_{i=1}^n M_i \delta_0 = 0$$

e que,

$$\sum_{i=1}^n M_i \dot{\theta}_i = 0$$

Considere-se a matriz não singular ([7,8])

$$G = I_{n-1} + \frac{1}{M_n} b b^T M_s, \text{ onde}$$

I_{n-1} é a matriz identidade de ordem $n-1$;

$$b = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T, ;$$

M_s é a matriz diagonal $[M_i]$.

Pode-se observar que ([7,8])

$$\alpha_i = \theta_i - \theta_n = \delta_i - \delta_n$$

e que α e θ podem ser relacionados, considerando-se que

$$\alpha_i = \theta_i + \frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^n M_i \epsilon_i, \quad i=1, \dots, n-1$$

pela expressão:

$$\alpha = G \theta, \quad \theta = [\theta_1 \dots \theta_{n-1}]^T$$

Considerando-se agora $d_1=0$, pode-se mostrar, tomando-se $\dot{\alpha} = \beta$, que

$$\dot{\beta} = -GM^{-1} f(P, F, \alpha) \quad (2.6)$$

$$\dot{\alpha} = \beta$$

é o sistema de equações diferenciais de primeira ordem que descreve a evolução do estado do sistema em relação ao movimento do centro de ângulo.

Observe-se então que, no caso de amortecimento / não uniforme far-se-á uso da expressão (2.4) para a descrição matemática do sistema de potência e, no caso de amortecimento uniforme ou amortecimento nulo, da expressão (2.6).

2.3 - Conceito de Estabilidade

Seja o sistema definido pela equação ([6]):

$$\dot{y} = f(y, u), \quad \text{onde}$$

$$\dot{y} \in \mathbb{R}^n, t \geq t_0 \geq 0, f = \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n \text{ e } u: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

Assumindo que o valor da entrada u tem m componentes constantes, podemos escrever:

$$\dot{y} = f(y) \tag{2.7}$$

Define-se movimento não perturbado como sendo o conjunto:

$$\Gamma = \{ (y(t), t) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid y(t) = y(t; (\bar{y}(0), 0)), t \geq 0 \}$$

onde $y(t) = y(t; (\bar{y}(0), 0))$ é a solução da equação (2.7) definida pela condição inicial $\bar{y}(0)$ no instante $t = 0$.

Diz-se que um movimento é estável quando ele se que um dado movimento não perturbado. Ou seja, para um dado movimento que começa em $(y(0), 0)$ na vizinhança de $(\bar{y}(0), 0)$

$$(\forall \epsilon > 0) (\exists \delta(\epsilon) > 0) (\forall t \geq 0) (\| (y(0), 0) - (\bar{y}(0), 0) \| < \delta$$

$$\rightarrow \| (y(t; (y(0), 0)), t) - (y(t; (\bar{y}(0), 0)), t) \| < \epsilon)$$

Conforme [6] o comportamento de uma variável $x(t; x(0), 0)$ dada por $x(t; x(0), 0) = y(t; y(0), 0) - y(t; \bar{y}(0), 0)$

e que descreve a evolução do movimento perturbado em relação ao movimento não perturbado, tomado como referência, determina ou não a estabilidade do movimento não perturbado.

São sugeridas como candidatos a movimento de refe

rência soluções de

$$f(y) = 0$$

que caracterizam movimentos paralelos ao eixo dos tempos.

Através de uma mudança de variáveis da solução, pode-se fazer com que um destes movimentos coincida com o eixo dos tempos, desta maneira tornando possível que a análise seja feita estudando-se a estabilidade da origem no espaço de estados R^n ([6, 9]).

2.4 - Estabilidade em Sistema de Potência

A obtenção dos movimentos de referência é feita como indicado no item anterior tomando-se, no caso da equação (2.5),

$$\dot{w} = 0$$

$$\dot{\alpha} = 0, \text{ com isto, temos:}$$

$$w = 0$$

$$f(P, F, \alpha) = 0$$

Estes movimentos de referência paralelos ao eixo dos tempos, correspondem, no R^{2n-1} , a pontos fixos chamados pontos de equilíbrio. No caso acima eles são da forma

$$[0, \alpha^e]^T, \quad 0 \in R^n, \quad \alpha^e \in R^{n-1}$$

Uma condição necessária para ter-se equilíbrio segundo [6,10] é que

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0$$

Existem situações [6,10] em que isto não ocorre. Cita-se, para exemplo, os casos em que a situação de depois do defeito difere da situação de antes do defeito pela perda de uma parcela de carga ou de geração. Nestes casos a velocidade de referência deve ser mudada.

Nos casos, onde $d_k \neq 0$, $k=1, \dots, n$ deve-se definir, para a situação de depois do defeito a nova velocidade [6]

$$w_i' = w_i - \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{\sum_{k=1}^n d_k} \quad i = 1, \dots, n \quad e \quad (2.8)$$

$$P_i' = P_i - d_i \cdot \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{\sum_{k=1}^n d_k} \quad (2.9)$$

Novos pontos de equilíbrio são obtidos, fazendo

$$w' = 0$$

$$f(P', F, \alpha') = 0, \text{ de modo que se tenha } \sum_{i=1}^n P_i' = 0$$

Para casos em que $d_k = 0$, $k=1, n$, toma-se

$$w_i'' = w_i - \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{\sum_{k=1}^n M_k} \cdot t \quad (2.10)$$

$$P_i'' = P_i - M_i \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{\sum_{k=1}^n M_k} \quad (2.11)$$

onde:

$$\sum P_i'' = 0$$

De maneira análoga ao caso anterior, obtém-se os pontos de equilíbrio.

Em [7] e [6] mostra-se, usando segundo método de Liapunov, que se existe $\alpha^e \in L$, onde $L = \{ \alpha \mid |\alpha_i| \leq \frac{\pi}{2}, |\alpha_i - \alpha_j| \leq \frac{\pi}{2}, i, j = 1, 2, \dots, (n-1) \}$, (2.12)

então $(0, \alpha^e)^T$ é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável do sistema.

Visando a análise da estabilidade de um ponto de equilíbrio de (2.5) colocado na origem, uma mudança de variáveis da forma:

$$z_i = \alpha_i - \alpha_i^e \quad i = 1, 2, \dots, (n-1)$$

é feita.

É mostrado em [6] que se α^e pertence a L^0 (interior de L), então o equilíbrio $(0, \alpha^e)^t$ é assintoticamente estável.

Sabendo-se que o ponto de equilíbrio é estável, a questão que segue diz respeito a magnitude das perturbações passageiras que o sistema suporta. Neste sentido, define-se e utiliza-se a noção de domínios de estabilidade.

2.5 - Determinação do Domínio de Estabilidade

Domínio de estabilidade exato de um ponto de equilíbrio estável é o conjunto de todas as condições iniciais tais que as trajetórias que passam por elas permanecem numa vizinhança do ponto de equilíbrio. Domínio de estabilidade assintótica de um ponto de equilíbrio estável é um conjunto como o acima com a particularidade de que o equilíbrio é alcançado quando o tempo tende a infinito. Define-se como domínio de estabilidade, qualquer subconjunto, aberto e conexo, do domínio exato de estabilidade que contém o equilíbrio em seu interior [6,9]. O segundo método de Liapunov fornece em geral meios para a determinação de domínio de estabilidade, desde que se disponha de uma função de Liapunov.

Na literatura encontram-se diversas funções de Liapunov para o estudo de estabilidade de sistemas de potência e, dentre elas, a função energia do sistema. Uma função candidata a função de Liapunov deve ser definida em sinal, isto é, com superfícies de nível fechadas ([9]), na vizinhança do ponto de

equilíbrio na origem.

O sistema de equações diferenciais representativo do sistema com o ponto de equilíbrio trasladado para a origem é dado por

$$\dot{w} = -M^{-1} R w - M^{-1} T^t f(P, F, Z + \alpha^e) \quad (2.13)$$

$$\dot{z} = T w$$

A função energia total do sistema ([2 a 6,8,11,12]) é dada por

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i w_i^2 + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} \left[-\cos(Z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - Z_{ij} \right. \\ \left. \sin \alpha_{ij}^e \right] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} \left[-\cos(Z_i + \alpha_i^e) + \cos \alpha_i^e - Z_i \cdot \sin \alpha_i^e \right] \quad (2.14)$$

onde:

$$Z_{ij} = Z_i - Z_j, \quad \alpha_{ij}^e = \alpha_i^e - \alpha_j^e$$

Mostra-se que esta função é uma função de Liapunov para a estabilidade do equilíbrio colocado na origem.

A função V é a soma da energia cinética. $E_C =$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i w_i^2 \quad \text{e a energia potencial } E_P = V - E_C. \quad \text{Da observação da expressão da função energia constata-se que a parcela da}$$

ção da expressão da função energia constata-se que a parcela da

energia cinética não apresenta restrições quanto a seu uso como função de Liapunov, pois é definida positiva para qualquer $w \in \mathbb{R}^n$. No entanto o mesmo não acontece com a parcela da energia potencial, tendo em vista os termos em co-seno em (2.14).

A função energia potencial possui uma região limitada onde ela apresenta as características de função de Liapunov e apresenta superfícies de níveis fechadas que contêm apenas o equilíbrio na origem em seu interior, até um dado valor de energia em que as superfícies de níveis deixam de ser fechadas. Sabe-se que a última superfície de nível fechada que contém o equilíbrio passa por um ponto de equilíbrio instável (ponto de sela). A energia total do sistema calculada em pontos da forma $[0, \alpha^e]^T$ é igual a energia potencial do ponto. Desta forma, determinar a maior superfície de nível fechada que contenha só um ponto de equilíbrio em seu interior se resume em encontrar o ponto de equilíbrio instável de menor energia potencial. Este ponto definirá o domínio de estabilidade como sendo uma região definida pelo nível de energia que é um limite de energia que o sistema pode adquirir de forma que a sua trajetória pós-defeito tenda ao equilíbrio com o tempo.

A grande dificuldade na aplicação deste método está na obtenção do ponto de equilíbrio instável que defina a superfície de nível desejada. Não existe um método geral que leve à determinação deste ponto, fato que desestimula a utilização dos procedimentos que utilizam pontos de equilíbrio instáveis como referência para obtenção de domínios de estabilidade.

2.6 - Método do Ponto de Sela

Como visto acima, fazendo-se uso da função energia total do sistema como função de Liapunov, a determinação do domínio de estabilidade é dada pelo ponto de equilíbrio instável de menor energia potencial (ponto de sela).

A obtenção do ponto de sela ([2,3,13 a 16]) é uma tarefa muito difícil e de resultados nem sempre satisfatórios. A não existência de um procedimento geral que leve diretamente à determinação do ponto de equilíbrio instável de interesse (ponto de sela), apesar de algumas tentativas que não levaram a resultados favoráveis, faz com que seja necessário encontrar todos os pontos de equilíbrio instáveis, para então se definir qual o de menor energia potencial.

Outra dificuldade está no número de pontos de equilíbrio instáveis que possa ter um sistema. Não existe um procedimento que defina este número. Conforme discussão em [14], o número máximo de soluções de equilíbrio do sistema (2.5) numa região definida por $-\pi \leq \alpha_i \leq \pi, i=1, \dots, n-1$, é 2^{n-2} , onde n é o número de máquinas do sistema.

Deste número, obtem-se a seguinte distribuição:

- no máximo $2^{n-1} - 1$ pontos de equilíbrio instáveis;
- no máximo $2^{n-1} - 2$ pontos de máximo;
- um ponto de equilíbrio estável.

As soluções que interessam para a obtenção do do mínio de estabilidade são os pontos de equilíbrio instáveis que são no máximo $2^{n-1} - 1$ pontos. A obtenção destes pontos envolve a solução do sistema de equações (2.5) tomando-se

$$\dot{\alpha} = 0$$

$$\dot{w} = 0$$

Desta forma a solução do sistema de equações re duz-se a um problema de fluxo de carga com o sistema de equações obtido de (2.11) com $\dot{Z} = \dot{w} = 0$, e que conduz a

$$P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m f_{ij} \text{ sen } (Z_i - Z_j + \alpha_i^e - \alpha_j^e)$$

Para a solução do sistema de equações algébricas não-lineares são encontrados diversos métodos na literatura, en tre os quais destacam-se os métodos de Fletcher-Powell e o de Newton-Raphson. O uso do método de Newton-Raphson tem seu uso justificado e recomendado em [13].

Para condições iniciais na origem a solução deve convergir para o ponto de equilíbrio estável. A questão que de ve ser respondida a seguir diz respeito a como definir condições iniciais de modo a obter os pontos de equilíbrio instáveis. Este problema tem sido enfrentado usando-se um procedimento em pírico com bom fundamento físico mas ainda sem demonstração ma temática. A dificuldade maior está no fato de não se conseguir definir com precisão todas as regiões possíveis onde dada uma

condição inicial se obtenha o ponto de sela contido nesta região. Este fato pode levar a casos onde, dadas condições iniciais diferentes obtenha-se o mesmo ponto de equilíbrio instável; casos onde para a condição inicial dada não se obtém convergência, é a situação mais grave de não se obter pontos de equilíbrio por não se dar condições iniciais em suas regiões de convergência.

Estas considerações introduzem um grau de incerteza muito grande relativamente ao ponto apresentado como ponto de equilíbrio instável de menor energia, pois pode ser que um dos pontos não obtidos tenha menor energia que o mesmo. Além disso, o fato de não se possuir a informação do número exato de ponto de equilíbrio instáveis deixa sempre a possibilidade de que um desses pontos não tenha sido encontrado.

2.7 - Método Aproximado de Prabhakara

Em [13] foi apresentado um trabalho em que a determinação de domínios de estabilidade é feita utilizando-se o conceito de ponto de equilíbrio instável de menor energia sem que sejam obtidos todos os pontos de equilíbrio instáveis.

Para tanto foi mostrado que a função energia varia muito pouco nas proximidades dos pontos de equilíbrio. Devido a isso, uma condição inicial que esteja próxima do ponto de equilíbrio terá um valor de energia com muito pequena diferença em relação à energia do mesmo. Desta forma, as energias calculadas nas condições iniciais podem substituir as energias dos pon

tos de equilíbrio instáveis, conseqüentemente dispensando a obtenção dos mesmos. O domínio de estabilidade ficaria definido pelo menor valor de energia encontrado nas condições iniciais dadas.

As condições iniciais a serem usadas foram obtidas a partir de uma analogia com um caso de máquina contra barra infinita, onde o ponto de equilíbrio instável conforme a figura é dado por $\delta^i = \pi - 2 \delta^e$ (equilíbrio trasladado p/a origem)

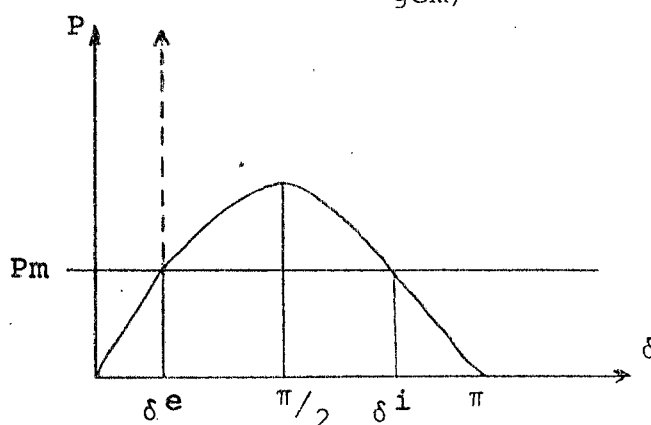


Fig. 1 - Curva Potência Ângulo

O conjunto de pontos onde são calculados os valores de energia é determinado pelas combinações dos valores $\delta_i = \pi - 2 \delta_i^e$ das n máquinas do sistema, sendo o número de combinações geradas $2^{n-1}-1$.

O resultado assim obtido seria de confiança se houvesse a certeza de que as condições iniciais usadas estivessem sempre suficientemente próximas dos pontos de equilíbrio instáveis, fato este que não é comprovado matematicamente e que introduz uma margem de incerteza no resultado.

Em [17] é apresentado um trabalho que elimina um problema que o método aproximado de Prabhakara havia apresentado com respeito à escolha da máquina de referência. Foi estabelecido um algoritmo que detecta resultados falsos obtidos a partir de uma máquina de referência inadequada para o caso em análise. Uma nova máquina de referência é escolhida e o processamento continua até que o resultado obtido passe no teste de resultados falsos.

Em [18] é abordado o problema do grande número de condições iniciais ($2^{n-1}-1$) a serem testadas. É então sugerido um procedimento que calcula o valor da energia em apenas $2n$ pontos, baseado na hipótese de perda de sincronismo de uma máquina em relação ao sistema. Estes pontos são:

a) n tentativas onde

$$\theta_k = \pi - 2\delta_k^e \quad e$$

$$\theta_i = \delta_i^e \quad \begin{array}{l} i=1, \dots, n \\ i \neq k \end{array}$$

para $k = 1, n-1$,

b) n tentativas onde

$$\theta_k = -\pi - 2\delta_k^e \quad e$$

$$\theta_i = \delta_i^e \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, n \\ i \neq k \end{array}$$

para $k = 1, n-1$

c) uma tentativa

$$\theta_i = \pi - 2 \delta_i^e \quad i = 1, \dots, n-1$$

uma tentativa

$$\theta_i = -\pi - 2 \delta_i^e \quad i = 1, \dots, n-1$$

Nas tentativas a) e b) admite-se que uma máquina perde o sincronismo e que o ponto de equilíbrio instável obtido é devido a essa máquina. Para o caso c) assume-se que a máquina que gera o ponto de equilíbrio instável é a máquina de referência.

Em um grande número de situações este procedimento foi testado com bons resultados, mas esta também não é uma regra que tenha validade assegurada sempre. Encontram-se situações em que outros tipos de combinações que não as sugeridas geram o valor de energia que indica o domínio de estabilidade.

2.8 - Método do Politopo

Para contornar estes problemas foi encontrado em [4,5,6 e 12] uma região onde a função energia total é uma função de Liapunov. Feito isto a determinação do domínio de estabilidade resume-se em encontrar a maior superfície de nível tangente e inteiramente contida na região de validade, de forma a dar um resultado confiável. A região de validade, por construção, possui apenas o ponto de equilíbrio estável em análise e,

devido a isto, a superfície de nível que definirá o domínio de estabilidade será sempre interior à superfície que passa pelo ponto de sela de menor energia potencial. Este fato faz com que o valor dado pela região de validade seja conservativo em relação ao dado pelo ponto de sela, portanto a favor da segurança, sem o perigo de apresentar um valor maior que o domínio de estabilidade relativo ao ponto de sela com menor energia potencial.

Mostra-se que a função energia (2.14) é válida como função de Liapunov para estabilidade assintótica da origem do sistema, na região

$$G = \{ (w, z)^t \mid z \in L_2 \}, \text{ onde}$$

$$L_2 = \{ z \mid (-\pi - 2\alpha_k^e) \leq z_k \leq (\pi - 2\alpha_k^e) \text{ e}$$

$$(-\pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)) \leq z_{kp} \leq (\pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)) \}$$

$$k, p = 1, \dots, n-1, k \neq p$$

O conjunto L_2 contém o conjunto L (2.11) se a hipótese $\alpha^e \in L$ é observada. Além disso prova-se ([4, 6]) que em L_2 a função de energia potencial, E_p , dada por

$$E_p = V - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i w_i^2$$

é uma função radialmente crescente. Portanto em G não existe nenhum outro ponto de equilíbrio assintoticamente estável α^e . Assim a superfície de nível com intersecção não vazia com a fronteira de L_2 , δL_2 , e contida em L_2 é uma superfície de nível fechada.

Obtida uma função de Liapunov, V , e determinada a região G onde ela é válida como função de Liapunov, em [4,6] o problema de encontrar um domínio de estabilidade assintótica para a origem pode ser resolvido através do problema de otimização,

$$\min_Z E_p(P, F, Z)$$

$$\text{s.a } Z \in \delta L_2$$

onde δL_2 é a fronteira do conjunto L_2 que é formada por faces que são subconjuntos contidos em hiperplanos de dimensão máxima no espaço de dimensão $n-1$, ou em intersecções de hiperplanos deste espaço vetorial.

Estes subconjuntos e hiperplanos são facilmente identificáveis tomando-se as relações que definem L_2 , considerando-se os extremos dos intervalos estabelecidos. A solução deste problema fornece um Z^* que especifica a tangência entre uma superfície de nível da função de energia potencial e a fronteira de L_2 , de tal modo que o conjunto de nível correspondente está contido em L_2 e tem intersecção com L_2 . O domínio de estabilidade assintótica para a origem é dado, então, por

$$D = \{ [w, Z]^t \mid V([w, Z]^t) < V([0, Z^*]^t) = E_p(F, P, Z^*) \}$$

O problema de otimização pode ser colocado como

$$\min_k \{ \min_Z E_p(Z) \}$$

$$\text{s.a } Z \in W_k \cap L_2$$

onde W_k é um hiperplano que contém a k -ésima face de dimensão máxima. As faces $W_k \cap L_2$ do politopo L_2 são do tipo

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

$$z_{kp} = z_k - z_p - (\pm \pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)) = 0$$

definidas, então, duas faces uma para $+\pi - 2\alpha_k^e$ e uma para $-\pi - 2\alpha_k^e$. O mesmo vale para $\pm\pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)$

A procura do ponto de tangência em uma dada face pode ser feita tomando-se uma das variáveis (z_k) ou a diferença de duas, ($z_k - z_p$), constante durante a busca na face, correspondente. Assim a parcela da função objetivo que depende de (z_k) ou ($z_k - z_p$) é constante e é chamada de limite inferior da energia potencial na face correspondente.

Pode-se decompor o problema da otimização ($[4,6]$) em subproblemas de dois tipos, conforme se tenha um ou outro tipo de face, (z_k) ou ($z_k - z_p$) constantes. Encontrar a solução do problema de otimização consiste em encontrar o mínimo entre os mínimos dos subproblemas. Para faces do tipo z_k constante, o subproblema pode ser enunciado como:

$$\min_Z E_p(Z)$$

$$\text{s.a. } z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e) = 0, \quad z \in L_2$$

Com o uso do multiplicador de Lagrange fica:

$$\min \{E_p(Z) + \lambda [z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)]\}$$

$$\text{s.a. } z \in L_2$$

Para faces do tipo $(z_k - z_p)$ constante, tem-se:

$$\min_Z E_p(Z)$$

s.a

$$z_k - z_p - [\pm \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e)] = 0$$

$$z \in L_2$$

Com o uso do multiplicador de Lagrange fica:

$$\min \{E_p(Z) + \lambda [z_k - z_p - (\pm \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e))]\}$$

$$\text{s.a. } z \in L_2$$

A solução iterativa dos problemas de otimização por Newton-Raphson será dado por:

$$z^{i+1} = z^i - J^{-1}(z^i) \Delta E(z^i)$$

onde ΔE representa 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 .

Devido às restrições do problema de otimização, Z_k ou $(Z_k - Z_p)$ constantes, existe uma parcela no valor da energia que permanece constante durante a procura do ponto de tangência na face em questão. Esta parcela é chamada de limite inferior, e é usada na escolha das faces a serem analisadas, conforme o algoritmo descrito a seguir ([4,5,12,19]):

2.9 - Algoritmo para Obtenção de Domínios de Estabilidade

1. Cálculo dos limites inferiores
2. Ordenação dos limites inferiores em ordem crescente
3. O primeiro valor da lista define a face a ser analisada
4. Toma-se como condições iniciais os valores de ângulos na origem, $\bar{Z} = 0$.
5. Calcula-se a inversa do Jacobiano e o gradiente do Lagrangiano em \bar{Z} .
6. Resolve-se para \bar{Z}

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{Z} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = J^{-1}(\Delta E)$$

7. Testa-se a convergência do algoritmo. Se não convergiu e não excedeu o número máximo de iterações, atualiza-se \bar{Z} e λ e retorna-se ao passo 5. Caso tenha excedido o número máximo de iterações, isto significa que

- não houve convergência, então toma-se o próximo valor da lista e entra-se no passo 4.
8. Se houve convergência, testa-se se o ponto de tangência pertence ao L_2 . Se não pertence, toma-se o próximo valor da lista e retorna-se ao passo 4.
 9. Se pertence, calcula-se o valor da energia potencial no ponto de tangência.
 10. Compara-se este valor com o valor do próximo elemento da lista ordenada. Se for maior, substitui-se o valor do limite inferior em análise pelo valor da energia e volta-se ao passo 2.
 11. Se o valor de energia for menor que o do limite inferior, então este valor define o domínio de estabilidade.

2.10 - Conclusões

Neste capítulo foi apresentado o modelo matemático do sistema de potência na forma de um sistema de equações diferenciais representativas do comportamento das máquinas do sistema. Foram feitas as hipóteses clássicas do estudo de estabilidade e foi usado o sistema reduzido às suas barras internas de geração.

Foi visto que a verificação de estabilidade de um dado movimento é feito observando-se o seu comportamento em relação a um movimento não-perturbado de referência. Este movimento em sistemas de potência são fixados pelo ponto de equilíbrio estável com ângulos em menor determinação.

Observou-se que para seguir o movimento de referência um movimento qualquer devia partir de uma certa região em sua vizinhança, definindo-se então o conceito de domínio de estabilidade a partir do conjunto de condições iniciais que definem movimentos que se aproximam, com o tempo, do movimento de referência.

Foi mostrado então que o domínio de estabilidade pode ser dado por uma superfície de nível fechada que contém em seu interior o ponto de equilíbrio estável e definida pelo ponto de equilíbrio instável de menor energia. A dificuldade para a obtenção deste último ponto levou a um processo alternativo proposto em [6], que foi descrito na parte final deste capítulo.

C A P Í T U L O I I I

ALGORÍTMO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA3.1 - Introdução

Neste capítulo discutem-se inicialmente os procedimentos para análise da estabilidade transitória em sistemas de potência descritos matematicamente, conforme mostrado no capítulo anterior. São comentados as principais etapas desta análise, bem como os cálculos básicos necessários. É proposto em seguida um algoritmo computacional para implementação do algoritmo conceitual apresentado no capítulo anterior e baseado no método do politopo. Para eficiência do algoritmo proposto faz-se uso da estrutura e interpretação física das parcelas que formam as expressões matemáticas envolvidas.

3.2 - Análise da Estabilidade em Sistemas de Potência

É importante para a operação e planejamento de um sistema elétrico de potência saber se um dado ponto de operação normal do sistema é capaz de suportar súbitas perturbações provocadas por algum defeito. Saber se o sistema evoluirá para um novo ponto de equilíbrio estável ou não, é o objetivo da análise de estabilidade em sistemas de potência.

Para grandes sistemas, ou seja, sistemas com n -máquinas existem, basicamente, dois tipos de procedimentos: os métodos diretos e os métodos indiretos. Os métodos indiretos, historicamente consagrados pelo seu uso, baseiam-se em métodos numéricos para a solução das equações diferenciais representativas do sistema de potência. A análise é feita observando-se o comportamento dos ângulos internos das máquinas ao longo do tempo. Se as diferenças angulares entre duas máquinas aumentarem com o tempo, diz-se que existe perda de sincronismo e o sistema é instável.

Podem ser citados como inconveniências do método, a necessidade de análise cuidadosa das curvas obtidas, a impossibilidade de se definir com exatidão o tempo de integração necessário para a obtenção de uma resposta confiável, a necessidade da intervenção humana para a definição da análise, impossibilitando um processamento automático, e o relativamente grande tempo de processamento necessário para a análise que aumenta muito com o número de barras e com uso de modelos mais reais de máquinas.

O segundo procedimento existente, métodos diretos, faz uso do segundo método de Liapunov. Este método fornece, em geral, condições suficientes para a estabilidade de um ponto de equilíbrio. Embora o segundo método não oriente a procura das funções de Liapunov, encontrada uma função de Liapunov que satisfaça as condições do método, pode-se tirar conclusões sobre a estabilidade do equilíbrio e sobre domínio de estabilidade. Conforme visto no capítulo anterior, usando a função energia do sistema como função de Liapunov pode-se obter um algo

rítmo conceitual que possibilite a determinação de domínios de estabilidade de um ponto de equilíbrio estável do sistema que pertença ao politopo L ([6]).

Como inconveniente do método pode ser citado que o domínio obtido é conservativo em relação ao domínio exato, isto pela restrição do politopo. O uso do domínio de estabilidade para a análise de estabilidade em sistemas de potência é feita da seguinte maneira :

1. Determinação do ponto de equilíbrio do sistema antes da falta.
2. Simulação da falta nos parâmetros do sistema.
3. Integração numérica do sistema passo a passo, durante a falta. A cada passo é calculado o valor da energia do sistema que é testado com o valor do domínio. Quando o valor for igual está encerrado o processamento e o valor do tempo definirá o tempo crítico de abertura.

Do exposto acima ficam caracterizadas três situações para o sistema, quais sejam:

1. Situação de antes do defeito, onde é definido o ponto de operação normal do sistema que servirá de condição inicial para a simulação do defeito.
2. Situação durante o defeito, onde é feita a simulação do comportamento do sistema, usando integração numérica.

3. Situação pós-defeito, onde se define o ponto de operação que se espera o sistema vá alcançar, e para o qual se obtém o domínio de estabilidade do sistema para a análise a ser feita.

Outras análises podem ser feitas mas são constituídas essencialmente dos passos acima.

Pelo exposto fica claro que o uso de domínios de estabilidade em sistemas de potência não prescinde do uso de integração numérica, embora a determinação do domínio de estabilidade seja independente do uso de integração. Deve ser observado, no entanto, que o tempo de integração é bem menor, pois a mesma só é feita no período durante a falta. Diferentemente do algoritmo de uso do domínio mostrado acima, onde chega-se à determinação do tempo crítico de abertura, a análise pode ser feita partindo-se de um tempo de abertura conhecido onde a preocupação é saber se o sistema permanece estável para uma dada contingência que durou um certo tempo. Este tempo de integração, então, é da ordem do tempo de abertura de um disjuntor, muito menor que o tempo total de integração necessário no método de integração numérica. Este último tipo de análise foi considerado neste trabalho e um algoritmo computacional para isto, será proposto adiante.

3.3 - Situação Antes do Defeito

O objetivo desta etapa é descrever o sistema em análise nas suas condições normais de operação, ou seja, a si

tuação de antes do defeito. Para análise de estabilidade transitória de um sistema as informações importantes são as que indicam os comportamentos de ângulo de suas máquinas geradoras. Para a obtenção destes valores deve ser resolvido um problema de fluxo de carga, obtendo-se os ângulos internos das máquinas.

Esta informação pode ser fornecida como dado desde que obtido num processamento anterior, dispensando o processamento do fluxo de carga. Para atender os objetivos de eficiência desejados, o fluxo de carga deve ser de rápida solução. Para tanto, o problema foi colocado na seguinte forma:

$$\text{Resolver } \Delta P = - B\Delta\theta \quad (3.1)$$

onde:

ΔP vetor de desvio de potência

B matriz de reatâncias do sistema

$\Delta\theta$ vetor de acréscimos de ângulos a ser determinado, dados ΔP e B.

Foi considerado que existe um desacoplamento entre potência ativa - ângulo e potência reativa - módulo de tensão. Desta maneira assumindo-se conhecidos os valores de môdulo de tensões das barras, ou entrando com os mesmos em forma de dados ou então assumindo valor de 1 p.u. para os mesmos, o problema pode ser colocado na forma proposta acima.

A solução de 3.1 é obtida iterativamente, usando

condições iniciais na origem. Visando eficiência foram usadas técnicas de esparsidade na solução do problema. O método utilizado no cálculo da inversa da matriz B foi o da bi-fatorização [20], o qual é descrito abaixo:

No processo de bi-fatorização o inverso de uma matriz é obtido implicitamente como o produto de n matrizes fatores. Então,

$$A^{-1} = R^{(1)} R^{(2)} \dots R^{(n-1)} R^{(n)} L^{(n)} L^{(n-1)} \dots L^{(2)} L^{(1)} \quad (3.2)$$

onde: $L^{(i)}$ e $R^{(i)}$ são matrizes fatores muito esparsas, obtidas no passo i , diferenciando-se da matriz unidade apenas na constituição da coluna i e linha i , respectivamente.

No caso da matriz A ser simétrica os termos de $R^{(i)}$ e $L^{(i)}$ guardam a seguinte relação:

$$r_{jk}^{(j)} = l_{ij}^{(j)} \quad \text{para } i = k \neq j$$

Este fato, somado ao da matriz fator R^i ter a diagonal unitária, possibilita o armazenamento da matriz reduzida, que é a inversa implícita na forma de n matrizes colunas ($L^1 L^2 \dots L^n$), em cima da matriz dos coeficientes A.

Para a determinação das matrizes fatores são definidas as matrizes intermediárias:

$$\begin{aligned} A^{(0)} &= A \\ A^{(1)} &= L^{(1)} A^{(0)} R^{(1)} \\ A^{(2)} &= L^{(2)} A^{(1)} R^{(2)} \\ &\text{-----} \end{aligned}$$

$$A^{(j)} = L^{(j)} A^{(j-1)} R^{(j)}$$

$$A^{(n)} = L^{(n)} A^{(n-1)} R^{(n)} = I$$

onde,

$A^{(i)}$ é a matriz resultante no passo i , sendo que $A^{(n)}$ é igual a matriz unidade. As matrizes fatores são obtidas, então, da seguinte maneira:

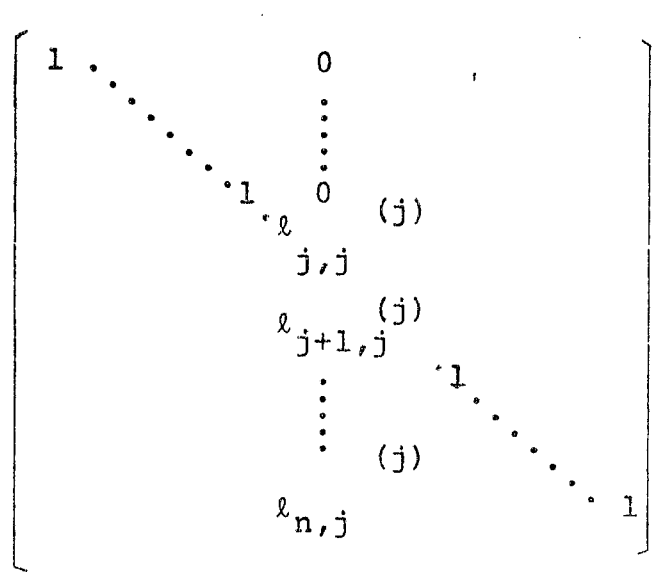
- matriz $A^{(j)}$

$$a_{jj}^{(j)} = 1 \quad ; \quad a_{ij}^{(j)} = 0 \quad ; \quad a_{jk}^{(j)} = 0$$

$$a_{ik}^{(j)} = a_{ik}^{(j-1)} - \frac{a_{ij}^{(j-1)} \cdot a_{jk}^{(j-1)}}{a_{jj}^{(j-1)}}$$

onde j é o índice de pivotamento e $i, k = (j+1), \dots, n$.

- matriz $L^{(j)}$



onde $l_{jj}^{(j)} = 1/a_{jj}^{(j-1)}$

$$l_{ij}^{(j)} = -a_{ij}^{(j-1)} / a_{jj}^{(j-1)}$$

$i = (j+1), \dots, n$

- matriz $R^{(j)}$

$$\left[\begin{array}{cccccccc} 1 & & & & & & & \\ & \cdot & & & & & & \\ & & \cdot & & & & & \\ & & & \cdot & & & & \\ & & & & \cdot & & & \\ & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & & \dots & \dots \\ & & & & & & & \dots \\ & & & & & & & \dots \\ & & & & & & & 1 \end{array} \right] \quad \text{onde}$$

$$r_{jk}^{(j)} = -\frac{a_{jk}^{(j-1)}}{a_{jj}^{(j-1)}} \quad k = (j+1), \dots, n$$

O uso da matriz inversa obtida implicitamente como mostrado acima, é feito pelo produto das $2n$ matrizes fatores conforme equação (3.2) pelo vetor o qual a matriz vai operar.

No caso em questão onde a matriz B é definida como

$$B = [b_{ij}] \quad , \quad \text{onde } i, j = 1, \dots, n-1$$

b_{ij} = susceptância entre barras i e j com sinal negativo

b_{ii} = somatório das susceptâncias comuns a barra i

onde os b_{ij} são valores constantes, a inversa da matriz B é obtida uma única vez e usada, portanto, constante no processo iterativo do método de Newton-Raphson.

Nos casos em que $X \gg R$ e $\sin \theta \approx \theta$, onde

X - reatância entre linhas

R - resistência entre linhas

pode ser usado o fluxo de carga DC, o que implica num ga

nho de tempo computacional e a formulação do problema torna-se:

- resolver $P = B \theta$ para θ

O uso da esparsidade, desejável em vista das matrizes B dos sistemas de potência serem bastante esparsas, faz com que as informações do sistema sejam armazenadas em vetores de uma forma em que somente os valores não nulos são guardados. Paralelo ao vetor dos valores não nulos há necessidade de formação de vetores de informação que possam dar condições de rápido acesso aos valores desejados. Os vetores usados foram:

	Y	Linha	Apont	Inic
1				1
2				2
3				⋮
⋮				⋮
⋮				n
m				

Y - vetor dos elementos não nulos da matriz.

Linha - indica a linha que pertence o elemento de Y

Apont - indica a posição em Y do próximo elemento da coluna a qual pertence o elemento de Y

Inic - indica a posição em Y do primeiro elemento da coluna i , onde $i = 1, \dots, n$.

m - número de elementos não nulos da matriz

n - número de colunas da matriz.

Os elementos não nulos são armazenados em pilha, de forma que através dos vetores descritos acima possam ser a cessados coluna por coluna. Devido o processamento exigir aces so sequencial a técnica usada é apropriada.

Resolvido o problema de fluxo de carga, obtido os ângulos internos e armazenada a estrutura do sistema em forma de vetores, o objetivo de descrição do sistema terá sido alcançado.

3.4 - Situação Durante-Defeito

O objetivo desta etapa é descrever a evolução do sistema durante a falta, ou seja, o comportamento dos geradores desde a aplicação até a eliminação da falta. O procedimento a ser usado é o de integração passo a passo das equações das mã quinas. O método escolhido é o de Euler modificado por ser de rápido processamento e normalmente dar bons resultados.

Para o uso do método são necessárias as seguintes informações: potências mecânicas e ângulos internos das máqui nas e matriz de admitância reduzida às barras internas. Os dois primeiros dados são conhecidos da situação de antes do defeito, sendo que as potências mecânicas permanecerão constantes por hi pótese e os ângulos internos servirão como condições iniciais para integração numérica, junto com as velocidades w_i tornadas nulas.

A obtenção da matriz reduzida é baseada na redu

ção de Kron aproveitando as técnicas de esparsidade na obtenção da inversa da matriz admitância. Com as hipóteses de representação de carga por impedância constante e os geradores por fontes de tensão constantes atrás de reatância transitória, podemos representar o sistema por:

$$\begin{bmatrix} I_g \\ 0_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gr} \\ Y_{rg} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ V_r \end{bmatrix}$$

onde os subscritos significam:

g - nós das barras internas, com injeção de potência

r - nós das outras barras, sem injeção de potência

Da equação acima, temos:

$I_g = (Y_{gg} - Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg}) \cdot V_g$, de onde se obtém a matriz reduzida

$$Y_{red} = Y_{gg} - Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg} \quad (3.3)$$

A obtenção da matriz Y_{rr}^{-1} da mesma forma que a matriz B^{-1} no problema de fluxo de carga é obtida implicitamente na forma do produto de $2n$ matrizes fatores. A matriz Y_{rr}^{-1} deve ser multiplicada pela matriz Y_{rg} conforme equação (3.3), no processo de obtenção da matriz reduzida. Esta multiplicação de matrizes pode ser decomposta em operações como as do fluxo de carga, da seguinte maneira:

1. decomponha a matriz Y_{rg} em matrizes colunas, ou seja

$$Y_{rg} = [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_n] , \text{ onde}$$

B_i coluna i de Y_{rg}

2. operando Y_{rr}^{-1} com cada um dos vetores B_i , obtemos a matriz resultante

$$M = Y_{rr}^{-1} \cdot Y_{rg} = [Y_{rr}^{-1} B_1 \ Y_{rr}^{-1} B_2 \ \dots \ Y_{rr}^{-1} B_n]$$

A seguir basta efetuar os cálculos matriciais restantes,

$$Y_{red} = (Y_{gg} - Y_{gr} M).$$

As equações diferenciais dos geradores a serem integradas numericamente, conforme modelo matemático (2.5)

$$\dot{\alpha}_i = w_i - 2 \pi f$$

$$\dot{w}_i = \frac{1}{M_i} (Pm_i - Pe_i - D_i \cdot w_i)$$

O modelo pode considerar amortecimento ou não, a diferença entre os dois casos para a análise está na parcela da energia cinética da função de Liapunov e no número de variáveis do sistema.

A trajetória dos ângulos internos dos geradores durante a falta, tem, em geral, um comportamento de forma:

- crescente parabólico,
 - decrescente parabólico, e
 - estável
- (ou combinação destes)

Estes tipos de comportamento justificam o uso de um método de integração pouco sofisticado com um passo de integração pode ser maior que o normalmente usado nos métodos de análise que usam integração numérica passo a passo. Estas considerações minimizam o tempo de processamento que será gasto com a integração numérica.

A integração deve ser realizada até o tempo estabelecido de duração da falta, tempo de abertura de um disjuntor. Ao final da integração teremos os valores de ângulos de máquinas no instante da eliminação da falta. Saber se esses ângulos evoluem para uma nova posição de equilíbrio (ponto de equilíbrio pós-defeito) é o objetivo da análise de estabilidade. Se estes ângulos pertencerem ao domínio de estabilidade do ponto de equilíbrio estável pós-defeito o sistema será estável.

3.5 - Situação Pós-defeito

Nesta etapa deve ser descrito a situação do sistema pós-defeito. É obtido o ponto de equilíbrio estável do sistema para a nova configuração e, também, determina-se o seu domínio de estabilidade. Com estas informações mais os ângulos

de máquinas no instante de eliminação da falta pode se fazer a análise de estabilidade transitória para a contingência em estudo.

A obtenção do ponto de equilíbrio estável consiste na solução de um fluxo de carga. Para tanto foi usado o mesmo procedimento adotado para a determinação do ponto de equilíbrio estável de antes do defeito. Este ponto foi usado como condição inicial dando uma convergência mais rápida do que se fosse usada a origem.

O algoritmo usado para a determinação do domínio de estabilidade segue a formulação feita em [4,19], e foi descrito no item 2.9. Foram inseridas algumas alterações, visando melhorar a velocidade de processamento das análises no sentido de tornar operacional o procedimento, estas alterações serão descritas no item 3.7.

3.6 - Verificação da Estabilidade Transitória

Um sistema de potência tem estabilidade transitória para uma dada contingência se as trajetórias das variáveis de estado evoluírem para um dado movimento de referência que é o seu ponto de equilíbrio pós-defeito. Pela definição de domínio de estabilidade isto acontecerá se os ângulos de máquinas pertencerem ao domínio de estabilidade do ponto de equilíbrio pós-defeito no instante de eliminação da falta. Os domínios de estabilidade obtidos nos processamentos conhecidos são dados em

forma de um valor de energia (superfície de nível) e, devido a isto, a verificação da estabilidade é feita comparando-se os valores de energia do domínio e do instante de eliminação da falta.

No procedimento usado para a determinação do domínio de estabilidade foi usada apenas a parcela correspondente a energia potencial da função energia. Como observado em 2.2 o número de variáveis que representam um sistema depende da existência ou não de amortecimento. Esta consideração faz com que a parcela correspondente a energia cinética assuma expressões diferentes para as diferentes situações. Desta forma, a função energia total do sistema usada como função de Liapunov é definida como

$$V = E_p + E_c$$

onde

E_p é a parcela correspondente a energia potencial e,

E_c é a referente à energia cinética.

a) Caso com amortecimento

A energia do sistema, considerando-se o modelo apresentado em 2.2, com a mudança para as variáveis Z , é

$$\begin{aligned}
 V = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i W_i^2 + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} \left[-\cos(Z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \right. \\
 & \left. + \cos \alpha_{ij}^e - Z_{ij} \cdot \operatorname{sen} \alpha_{ij}^e \right] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} \left[-\cos(Z_i + \alpha_i^e) + \right. \\
 & \left. \cos \alpha_i^e - Z_i \cdot \operatorname{sen} \alpha_i^e \right] ,
 \end{aligned}$$

onde:

$$Z_{ij} = Z_i - Z_j , \quad \alpha_{ij}^e = \alpha_i^e - \alpha_j^e ,$$

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i w_i^2 , \text{ onde}$$

w_i = são as variações em relação à velocidade síncrona.

b) Caso sem amortecimento

No caso sem amortecimento, considerando-se o movimento do centro de ângulo como movimento de referência, a noção de estabilidade segundo Liapunov está diretamente ligada com a proximidade do sistema em relação ao movimento do centro do ângulo. Neste caso, para se decidir sobre a estabilidade não é necessário considerar-se a parcela de energia que acelera o centro de ângulo ([7]). Pode-se então fazer uso da função Liapunov formada da seguinte maneira

$$V = E_p + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \theta_i^2$$

onde,

$$\sum_{i=1}^n M_i \dot{\theta}_i^2 = \sum_{i=1}^n M_i \dot{\delta}_i^2 - \frac{1}{2} M_0 \dot{\delta}_0^2, \quad M_0 = \sum_{i=1}^n M_i$$

Considerando-se o modelo definido em 2.2 mostra-se em [7,6] que

$$V = E_p + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} M_i \beta_i^2 - \frac{1}{2} \frac{1}{M_0} \left[\sum_{i=1}^{n-1} M_i \beta_i \right]^2$$

A diferença entre as funções usadas está ligada com o movimento de referência usado e a não consideração, no caso sem amortecimento, da energia associada com o centro de ângulo. Observa-se que a parcela da energia potencial E_p é a mesma para as duas funções.

Determinado o domínio de estabilidade, calculado o valor da energia no instante de eliminação da falta, a análise a ser feita comparando-se estes valores leva a dois tipos de resultados, quais sejam:

- se o domínio for maior que o valor de energia calculado no instante de eliminação da falta, então o sistema é estável para a contingência estudada;
- se o domínio for menor, então nada pode se afirmar sobre a estabilidade do sistema, podendo o mesmo ser estável ou instável. Isto acontece pelo fato do domínio de estabilidade usado ser conservativo.

Como se mostrou, para a análise da estabilidade transitória, é essencial o conhecimento de domínios de estabili

dade, isto é, do sub-conjunto de condições iniciais a partir das quais a trajetória definida por outras condições iniciais, evoluam para o equilíbrio do sistema.

Assim para análise da estabilidade e tendo-se em vista as dificuldades mencionadas em relação ao uso dos métodos descritos, propõe-se, abaixo, um algoritmo computacional para a determinação de domínios de estabilidade pelo método do polítopo, que faz uso da estrutura das matrizes e da interpretação de grandezas e parcelas envolvidas na descrição matemática do sistema, buscando com isso eficiência de cálculo.

3.7 - Uso do Jacobiano Constante no Problema de Tangência

Na solução do problema de otimização, deve ser resolvida iterativamente a expressão $\begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = J^{-1} \Delta E$ para Z (item 6 algoritmo em 2.8). Deve ser calculado e obtido a inversa do Jacobiano a cada iteração, isto representa um tempo relativamente grande de computação a medida que o número de faces a serem analisadas aumenta. Sugere-se então o uso do Jacobiano constante calculado na origem, sendo necessário portanto, inverter o mesmo apenas uma vez. Este artifício faz com que o número de iterações aumente mas diminui consideravelmente o tempo gasto para executá-las. Observou-se que nas faces em que há convergência o algoritmo é bem comportado, necessitando de poucas iterações para convergir, o que significa que o tempo ganho com o uso do Jacobiano constante é bem maior que o tempo gasto com o pequeno número adicional de iterações.

Conforme descrito no item anterior, o Jacobiano a ser usado é calculado na origem e mantido constante durante o processo iterativo. Desta maneira J deve ser calculado e invertido para cada face. Num processamento que tem por objetivo minimizar tempo, esta necessidade é uma deficiência que torna-se cada vez mais sensível a medida que o número de faces cresce. Pela análise da formulação do problema de otimização, chegou-se a conclusão que a diferença entre os Jacobianos calculados na origem para diferentes faces está apenas na última linha e na última coluna. A formulação do problema de otimização é a seguinte:

Considerando que se tem uma face do tipo Z constante, temos o seguinte problema:

$$\min_Z E_p(Z)$$

$$\text{S.a. } Z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e) = 0, \quad Z \in L_2$$

Usando multiplicador de Lagrange λ , vem

$$\min \{ E_p(Z) + \lambda [Z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)] \} \quad (3.4)$$

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

Calcula-se então o gradiente de $E = E_p(Z) + \lambda [Z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)]$ que é dado por,

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} \left[\sin (Z_{ij} + \alpha_{ij}^e) - \sin \alpha_{ij}^e \right] + \\ &+ F_{in} \left[\sin (Z_i + \alpha_i^e) - \sin \alpha_i^e \right] \end{aligned}$$

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

$$\Delta E_k = \sum_{j=1}^{n-1} F_{kj} \left[\text{sen} (z_{kj} + \alpha_{kj}^e) - \text{sen} \alpha_{kj}^e \right] +$$

$$+ F_{kn} \left[\text{sen} (z_k + \alpha_k^e) - \text{sen} \alpha_k^e \right] + \lambda$$

$$\Delta E_n = z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)$$

onde,

$$\Delta E_i = \frac{\partial}{\partial z_i} \{ E_p(z) + \lambda [z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)] \} \quad i=1, 2, \dots, n-1$$

e

$$\Delta E_n = \frac{\partial}{\partial \lambda} \{ E_p(z) + \lambda [z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)] \}$$

O Jacobiano do gradiente (ou Hessiana de $E_p(z) +$

$+ \lambda [z_k - (\pm \pi - 2 \alpha_k^e)]$) será dado por,

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

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

$$J_{n,i} = J_{i,n} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq k$$

$$J_{n,k} = J_{k,n} = 1$$

onde,

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

e

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

A condição necessária para o mínimo de (3.4) é

$$\nabla E = 0$$

A solução iterativa por Newton-Raphson é dada por

$$z^{i+1} = z^i - J^{-1} \Delta E \quad \text{ou}$$

$$\Delta Z = -J^{-1} \Delta E \quad \text{ou} \quad \Delta E = -J \Delta Z$$

Observando-se as expressões para o cálculo dos elementos do Jacobiano, verifica-se que, quando na origem, eles tem o mesmo valor independente da face a ser analisada. Isto só não se verifica para os elementos da última linha e da última coluna, pois os mesmos dependem da face k a ser analisada, uma vez que,

$$J_{n,i} = 0 \quad J_{i,n} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad i \neq k$$

$$J_{n,k} = J_{k,n} = 1$$

O mesmo tipo de constatação se obtêm para as faces do tipo $(z_k - z_p)$ constantes. Neste caso os elementos da última linha e da última coluna são obtidos por:

$$J_{n,i} = 0 \quad J_{i,n} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad i \neq k, \quad i \neq p$$

$$J_{n,k} = J_{k,n} = 1$$

$$J_{n,p} = J_{p,n} = -1$$

Esta situação sugeriu a idéia de se aproveitar a inversa obtida para a primeira face analisada na obtenção da inversa das outras faces. O método usado para a inversão do Jacobiano é o de fatoração LU. Obteve-se então um algoritmo que recalcula a última linha e a última coluna das matrizes LU para a nova face a ser analisada. As expressões obtidas foram as seguintes:

$$L_{n+1,i} = (A_{n+1,i} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{n+1,k} \cdot U_{k,i}) / U_{i,i} \quad i = 2, n$$

$$L_{n+1,1} = \frac{A_{n+1,1}}{U_{11}}$$

onde A é a matriz que armazena as matrizes LU da face anterior, com exceção da última linha e coluna onde A tem os seguintes valores

$$A_{n+1,i} = 0 \quad \text{para } i=1, n+1, \quad i \neq k_1 \quad \text{para faces } z_{k1} = \text{cte.}$$

e

$$\begin{matrix} i \neq k_1 \\ i \neq k_2 \end{matrix} \quad \text{para faces } z_{k1} - z_{k2} = \text{constante}$$

$A_{n+1,kl} = 1$ ou $A_{n+1,kl} = 1, A_{n+1, k2} = -1$, conforme o tipo de face analisado. Os termos de U são obtidos por:

$$U_{i,n+1} = A_{i,n+1} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{i,k} \cdot U_{k,n+1} \quad i = 2, n+1$$

$$U_{1, n+1} = A_{1, n+1}$$

Através das expressões acima constata-se que tanto os valores de L como de U que precedem o termo na coluna ou na linha kl , respectivamente, darão valores zero, portanto o processamento deve iniciar na posição definida por kl .

3.8 - Limites Inferiores

Conforme o algoritmo apresentado em [4,19] e descrito em 2.4, os limites inferiores eram ordenados inicialmente e processados na ordem obtida. Um dado limite inferior processado poderia ocasionar as seguintes situações:

- a) não havia convergência na sua face, então ele era abandonado;
- b) havia convergência mas o ponto obtido não pertencia a L_2 , e, da mesma forma que na situação anterior o limite era abandonado;
- c) existia convergência e o valor da energia calculada no ponto era menor que o do próximo limite inferior da lista, neste caso o valor de energia define o domínio de estabilidade;

- d) idêntico ao caso anterior mas o valor de energia é maior, neste caso o valor do limite inferior deve ser substituído pelo valor de energia obtido e este novo valor de limite inferior deve ser reposicionado na lista ordenada.

O grande problema do procedimento descrito acima diz respeito aos limites inferiores que processados se enquadram na situação d pela necessidade de reordenação da lista dos limites inferiores. Na verdade, deve ser incluído apenas um novo elemento em uma posição intermediária da lista ordenada. Esta situação é mostrada na figura abaixo:

1	l_1		1	l_1
2	l_2		2	l_2
3	l_3		3	l_3
⋮	⋮		⋮	⋮
17	l_{17}		17	l_{17}^*
18	l_{18}		18	l_{18}
19	l_{19}		19	l_{19}
⋮	⋮		⋮	⋮
n-1	l_{n-1}		n	l_{n-1}
n	l_n		n+1	l_n
	lista inicial			nova lista

A nova lista foi obtida a partir do processamento de um limite inferior, no caso o 19 da lista, que deu como resultado a situação d. O novo valor do limite inferior deve entrar na lista ordenada em nova posição, ocasionando um deslocamento de posição em todos os elementos seguintes. Considerando que o número de elementos da lista pode ser grande e que os limites inferiores devem levar consigo, além do seu valor, outras

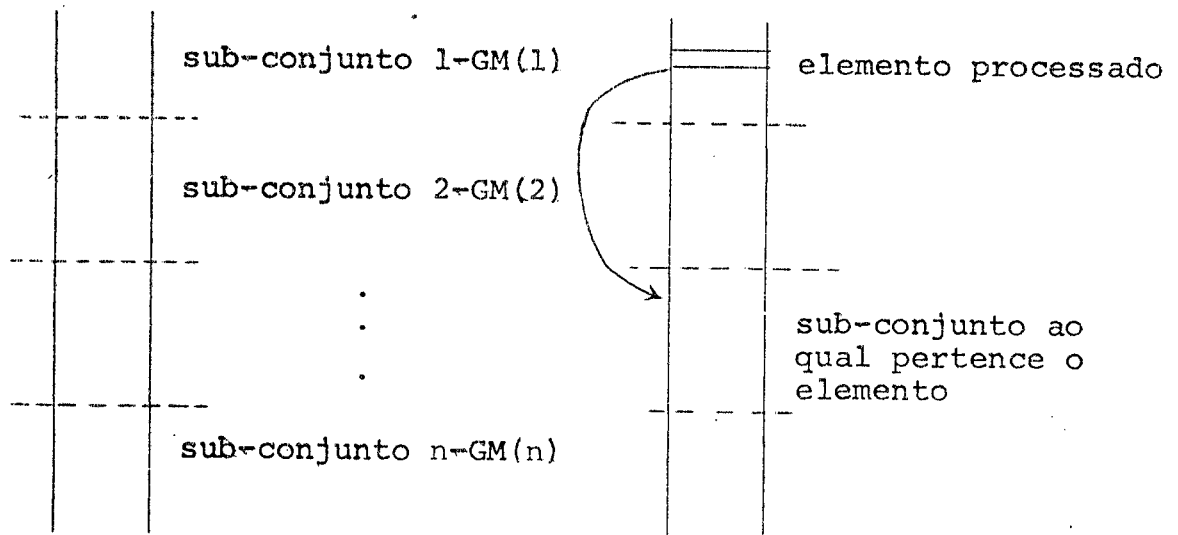
informações tais como face e lado, chegou-se a conclusão que devia ser adotado um outro procedimento que minimizasse o tempo gasto nesta tarefa.

A regra de parada para obtenção do domínio de estabilidade definida pela situação C dá a informação de que o processamento deve terminar em algum elemento intermediário da lista, ou seja, que nem todos os limites inferiores serão processados. Esta constatação levou a idéia de usar sub-conjuntos de limites inferiores, definidos de maneira a trabalhar com um número de elementos que possibilite uma ordenação rápida e, também, uma eficiente recolocação dos limites inferiores alterados. Os sub-conjuntos foram construídos da seguinte maneira:

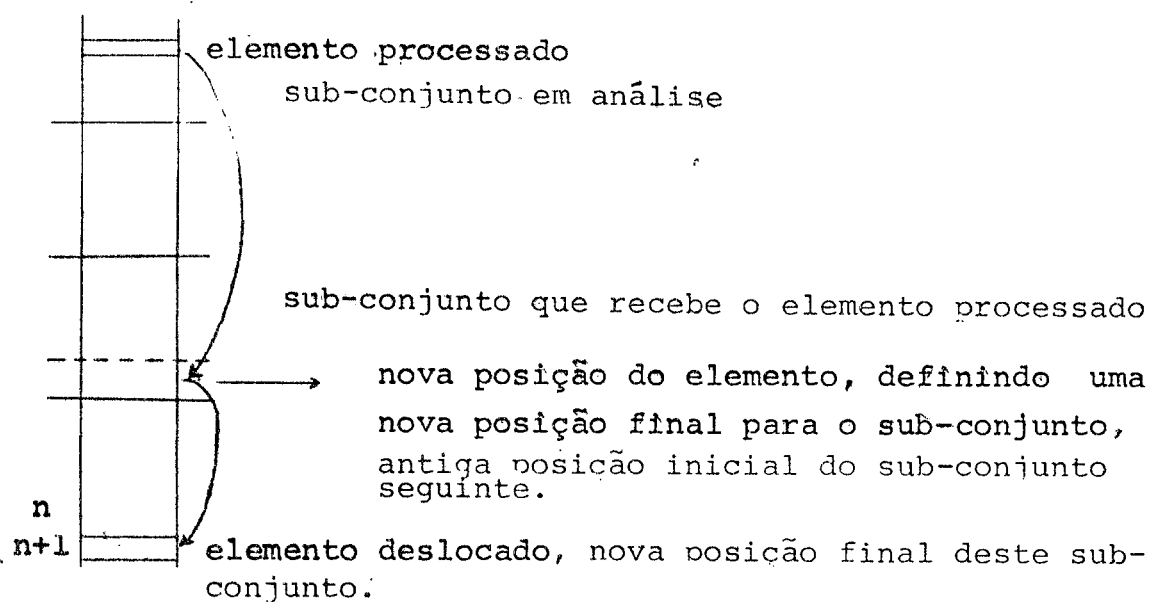
1		
2		
3		
4		subconjunto 1
5		GM(1) valor máximo no sub-conjunto 1
⋮		
⋮		
⋮		
⋮		
n		subconjunto n
		GM(n) valor máximo no sub-conjunto n

onde no sub-conjunto 1 estão os limites inferiores que são menores ou iguais a um dado valor máximo para o sub-conjunto (GM(1)), da mesma forma no sub-conjunto i estarão os limites inferiores menores ou iguais a um valor máximo para o sub-conjunto i (GM(i)). Para a obtenção dos sub-conjuntos foi usada a técnica das dicotomias em relação a média. A obtenção des

tes sub-conjuntos é muito rápida em relação a uma ordenação total de todos os limites inferiores que será dispensada. É sabido que por mais eficiente que seja a técnica usada o tempo gasto para ordenação de valores cresce muito com o aumento do número de valores. Desta maneira o tempo gasto com a formação dos sub-conjuntos mais a ordenação dos sub-conjuntos à medida que forem solicitados (nem todos serão solicitados) será menor que o tempo gasto com a ordenação total, sendo que esta diferença tende a aumentar com o número de limites inferiores. Outro problema diz respeito à recolocação de valores na lista, a técnica usada foi a seguinte:



Seja um elemento processado no sub-conjunto i que gerou um novo elemento a ser recolocado. Através de testes do valor do elemento com os GM dos sub-conjuntos $i + 1$ em diante, determina-se o sub-conjunto ao qual pertence o elemento. A maneira de introduzir o elemento no sub-conjunto é mostrada abaixo:



Com este procedimento basta mexer em uma posição em cada sub-conjunto a partir daquele a qual pertence o novo elemento e redefinir as posições finais dos mesmos. Isto evita a pesquisa e a modificação em todas as posições a partir da nova posição do novo limite como era feito no procedimento anterior.

3.9 - Regra de Parada

Um outro artifício no sentido de minimizar o tempo de processamento foi obtido pela análise da regra de parada. O domínio de estabilidade é obtido quando o valor de energia na face, correspondente ao limite inferior analisado, for menor que o próximo valor da lista ordenada. Um dado limite inferior que processado se enquadrar na situação a gerará um novo limite inferior que é o valor da energia na sua face, e que ocupará uma nova posição no seu subconjunto, a qual quando o mesmo estiver

sob análise (portanto ordenado), será menor que o valor do próximo elemento da lista. Se o domínio de estabilidade não for obtido até que o processamento atinja este valor; o domínio de estabilidade será definido pelo mesmo, pois o valor de energia na face será igual ao do limite inferior e será menor que o próximo valor da lista. Devido a isto não existe necessidade de reprocessar este limite inferior, bastando que exista uma indicação que o mesmo foi gerado por um outro limite inferior. Mas a melhoria mais significativa está no fato de que todo novo limite inferior gerado pode ser desprezado se houver um limite inferior gerado anteriormente de valor menor que o mesmo, uma vez que o algoritmo terminaria ali. Desta maneira basta guardar o menor dos novos limites inferiores para que se evite de relocar uma série de novos limites inferiores.

Devido ainda ao significado de alguns valores intermediários e à observância de algumas características do método, existe a possibilidade de que se chegue a uma conclusão sem que seja necessário processar-se o algoritmo até a obtenção do domínio de estabilidade. Estas situações serão descritas a seguir:

- Estabilidade do Ponto de Equilíbrio

A estabilidade do ponto de operação pós-defeito é testada verificando-se se o mesmo pertence ao conjunto L. Se pertencer o mesmo é estável e pode ser feito o estudo da contingência, Caso contrário nada se afirma sobre a contingência.

- Uso do Politopo L_2

O domínio de estabilidade por construção está contido no politopo L_2 . Segue que uma condição necessária para que, utilizando-se o procedimento proposto, se tenha estabilidade pós-defeito é que o estado final em defeito pertença a L_2 . Se o estado final em defeito não pertence a L_2 , então nada se poderá afirmar sobre a estabilidade, não havendo necessidade de se calcular o domínio.

- Uso dos Limites Inferiores

Por sua definição é possível concluir que todo o limite inferior, que antecede na lista o limite que vai gerar o domínio, fornece, através de seu valor, um domínio de estabilidade de menor valor que o mesmo. Desta maneira se o valor da energia total, calculado no instante de eliminação da falta, for menor que um destes domínios parciais, o processamento pode ser interrompido e conclui-se que o sistema é estável para a contingência em estudo.

- Uso da Cota Superior

A solução para o problema de determinação do domínio de estabilidade é, como mostrado, encontrada através de um algoritmo que fornece um ponto onde o valor de E_p é mínimo absoluto, considerando-se todos os pontos sobre a fronteira de L_2 . Neste caso, em qualquer ponto da fronteira de L_2 , o valor da energia potencial é maior ou igual ao valor deste mínimo absoluto.

Então, qualquer ponto da fronteira gera um valor de energia potencial, chamado cota superior, que é maior que o valor da energia potencial calculada no ponto de mínimo absoluto. Assim se o valor da energia total calculado na condição inicial for maior que uma cota superior, então esta condição inicial não pertence ao interior do domínio de estabilidade.

Um candidato a cota superior é o valor da energia potencial calculado no ponto dado na primeira iteração do algoritmo do ponto de tangência, se este ponto correspondente à 1ª iteração é um ponto de L_2 . O ponto de tangência, que é o mínimo da energia na face, se encontrado, é um outro valor de cota superior. O mesmo por ser de menor valor que o da 1ª iteração dá um valor que limita mais o valor da energia total calculada na condição inicial. Este valor de cota superior vai sendo redefinido ao longo do algoritmo a medida que apareçam valores de energia menores. No caso em que se obtenha o resultado nada se afirma através do confronto entre o valor do domínio e o valor da energia na condição inicial a cota superior é igual ao domínio.

3.10 - Descrição do Algoritmo

Os procedimentos acima descritos, permitem a separação rápida, sem necessidade de se calcular o domínio de estabilidade, dos casos em que nada se pode afirmar, e definir estabilidade através do uso de limites inferiores em outros casos, contribuindo então para o aumento da eficiência do algoritmo.

O algoritmo modificado pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Obtenção do ponto de equilíbrio estável antes do defeito;
2. Simulação do defeito e obtenção do ponto de equilíbrio pós-defeito;
3. Verifica-se se o ponto de equilíbrio pós-defeito pertence a L:
não - nada se afirma sobre a estabilidade e interrompe-se o processamento;
sim - continua-se o processamento;
4. Integra-se numericamente o sistema sob defeito até o instante de eliminação da falta;
5. Verifica-se se os ângulos de máquinas, neste instante, pertencem ao politopo L_2 :
não - nada se afirma e interrompe-se o processamento;
sim - continua-se o processamento;
6. Calcula-se o valor da energia no instante de eliminação da falta - ENER;
7. Inicia-se o procedimento para determinação do domínio de estabilidade;
8. Obtem-se os valores dos limites inferiores;
9. Faz-se a pré-ordenação dos limites em sub-conjuntos;
10. Ordena-se o sub-conjunto que vai se analisar;

11. Toma-se, no sub-conjunto em estudo, o limite inferior a ser analisado;
12. Compara-se o valor do limite inferior com o valor de energia (ENER):
 - se o limite inferior for maior o sistema é estável para a contingência em estudo e interrompe-se o processamento;
 - se o limite inferior for menor continua-se o processamento;
13. Se for o primeiro limite inferior analisado, calcule o Jacobiano na origem e faça a sua fatoração LU, se não for vá para o passo seguinte;
14. Faça a complementação das matrizes LU calculando, respectivamente, as suas últimas linhas e colunas;
15. Dê como condição inicial $\bar{Z} = \bar{0}$;
16. Calcule o gradiente do lagrangiano $\Delta\bar{E}$ em \bar{Z} ;
17. Resolva por substituição direta e inversa, usando as matrizes LU do Jacobiano aumentado, o sistema

$$[\Delta\bar{E}] = [J] \begin{bmatrix} \Delta Z \\ \lambda \end{bmatrix}$$
18. Testa-se a convergência do algoritmo. Se não convergiu e não excedeu o número máximo de iteração, atualiza-se \bar{Z} e λ e retorna-se ao passo 16. Caso tenha excedido o número máximo de iterações, toma-se o próximo limite inferior do sub-conjunto em análise e retorna-se ao passo 12. Se houver terminado os elementos do sub-conjunto em análise, toma-se o próximo sub

conjunto e retorna-se ao passo 10;

19. Se houve convergência, testa-se se o ponto pertence ao L_2 . Se não pertence, abandona-se a análise deste limite inferior e procede-se como no item anterior para o caso em que não houve convergência.
20. Se pertence, calcula-se o valor da energia no ponto de tangência;
21. Testa-se para saber se este valor é o menor valor de energia encontrado até agora nos pontos de tangência. O primeiro valor de energia a ser encontrado é o correspondente ao primeiro limite inferior em que houve convergência. Se for o menor valor de energia, então toma-se este valor para cota superior. Caso contrário, abandona-se este limite e procede-se como nos passos 18 e 19;
22. Definida a cota superior compara-se este valor com o valor da energia (ENER):
 - se a cota for menor então nada se afirma sobre a estabilidade, interrompendo-se o processo;
 - se a cota for maior continua-se o processamento;
23. Testa-se o valor da cota superior com o próximo limite inferior da lista ordenada:
 - se a cota for maior, substitui-se o valor do limite inferior analisado pelo valor da cota e recoloca-se este limite inferior no sub-conjunto ao qual ele passa a pertencer. Procede-se então como nos passos 18 e 19, para o acesso ao próximo limite inferior;

- se a cota for menor, encontrou-se o domínio de estabilidade, mas como o valor da cota é menor que o valor da energia (ENER), nada se afirma sobre a estabilidade, interrompendo-se o processo.

Este procedimento usou-se na elaboração do programa para computador digital que faz a análise de estabilidade transitória de um sistema elétrico de potência para uma dada contingência. O estudo de estabilidade transitória no planejamento de sistemas de transmissão e operação de sistemas demanda a necessidade de se processar uma série de simulações de defeitos. Estes defeitos são selecionados pelo conhecimento que o engenheiro tem do sistema e a sua capacidade de prever as ocorrências mais graves.

3.11 - Processamento de Várias Contingências

A necessidade de se processar mais de um caso fez com que se procurasse uma maneira de atendê-la, dentro do programa, com a maior eficiência computacional possível. Constatou-se que adotando-se certos procedimentos quanto a seqüência de casos a serem processados tornava possível um grande ganho de tempo de processamento.

A orientação seguida no sentido de otimizar o uso do programa foi a de aproveitar ao máximo os resultados obtidos anteriormente e evitar a repetição de qualquer operação já efetuada. A seguir será listada uma série de possíveis situações e os procedimentos usados nas suas soluções.

3.11.1 - Otimização do Uso da Integração Numérica

Para a realização da integração numérica do sistema durante o defeito é necessário fazer a simulação do curto-circuito numa de suas barras, alterando com isso a configuração do sistema. No modelo adotado do sistema isto é feito fazendo com que a tensão na barra em questão assuma o valor zero. Para se obter isso, basta que se elimine a linha e a coluna referente à barra na matriz admitância de barras. Esta modificação se refletirá na obtenção da matriz de admitância reduzida às barras internas, a qual é usada na integração numérica. Portanto para casos de curto-circuitos em diferentes barras, diferentes matrizes deverão ser obtidas.

As observações feitas acima permitem que se estabeleça uma primeira orientação para a utilização do programa:

"Todos os casos de curto-circuito que envolvam uma mesma barra, de uma série de casos a serem processados, devem estar colocados juntos na ordem de processamento da série".

Exemplificando, seja um sistema constituído das barras 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Suponha que se deseje processar os seguintes casos:

BARRA DO C.C.	LINHA RETIRADA
1	1 - 2
2	2 - 3
3	3 - 4
1	1 - 5
4	3 - 4
2	2 - 5

Pela regra citada acima, a ordem de processamento dos casos deve ser a seguinte:

CASO	BARRA DO C.C.	LINHA RETIRADA
1	1	1 - 2
2	1	1 - 5
3	2	2 - 3
4	2	2 - 5
5	3	3 - 4
6	4	3 - 4

Isto permite que para os casos 1 e 2 seja usada uma mesma matriz e de forma análoga isto acontece com os casos 3 e 4. Este procedimento permite um ganho de tempo que torna-se mais significativo quando a seleção de casos a serem processados tem como critério a escolha de áreas (ou barras) críticas, fazendo com que o número de casos de curto numa mesma barra seja significativo.

Uma outra observação que sugere uma nova orientação, diz respeito aos tempos de abertura dos disjuntores que são os dados que definem os intervalos de integração. Na seleção de casos pode se desejar simular um curto-circuito numa barra com diferentes tempos de abertura de uma dada linha. Este tipo de situação, em combinação com a situação anterior, sugere uma segunda orientação, que é uma complementação da primeira, a qual seja:

"Todos os casos de curto-circuito de uma mesma barra, além de estarem juntos devem estar classificados em ordem crescente dos seus tempos de abertura".

Para exemplificar, seja um sistema de 6 barras onde se deseja processar:

BARRA DO C.C.	LINHA	RETIRADA	TEMPO DE ABERTURA (CICLOS)
1	1	2	1.5
1	1	2	3.0
2	2	3	3.0
3	3	4	3.0
1	1	5	2.0
1	1	5	6.0
2	2	5	1.5
2	2	5	3.0
2	2	5	<u>6.0</u>
			29.0 (Tempo total)

Pelas regras apresentadas a ordem de processamento deve ser a seguinte:

CASO	BARRA DO C.C	L.RETIRADA	T.ABERTURA
1	1	1 - 2	1.5
2	1	1 - 5	2.0
3	1	1 - 2	3.0
4	1	1 - 5	6.0 6.0
5	2	2 - 5	1.5
6	2	2 - 5	3.0
7	2	2 - 3	3.0
8	2	2 - 5	6.0 6.0
9	3	3 - 4	3.0 <u>3.0</u>
			(tempo total) 15.0

Os ganhos de tempo com a sequência orientada são os seguintes:

- a matriz reduzida às barras internas usada para os casos 1, 2, 3 e 4 é a mesma, da mesma forma para os casos

5, 6, 7 e 8.

- a possibilidade de usar a integração numérica feita num caso anterior como condição inicial para o caso seguinte faz com que o tempo de integração seja diminuído, bastando fazer a complementação do tempo desejado. Para os casos do exemplo, o ganho de tempo usando a sequência orientada e o aproveitamento de valores de um caso como condição inicial para o outro, confrontado com um procedimento que considera-se os casos independentemente, seria de (29-15) 14 ciclos de integração numérica.

O procedimento de simular um curto e abrir em tempos diferentes é usado para a pesquisa do tempo crítico de abertura.

3.11.2 - Otimização do Uso do Domínio de Estabilidade

Na determinação do domínio de estabilidade, para uso na análise de estabilidade transitória de um sistema que foi submetido a uma dada contingência, as informações necessárias são o ponto de equilíbrio pós-defeito do sistema e a sua configuração pós-defeito representado pela matriz reduzida às barras internas. Desta maneira, pelo exposto acima, fica claro que o domínio de estabilidade depende tão somente de sua configuração pós-defeito, sendo independente das situações de operação pré-falta e durante falta exceto do nível de injeção de potência mecânica nas máquinas que é, por hipótese, o mesmo de pós-defeito. Conclui-se então que diferentes situações que le

vem a uma mesma configuração pós-defeito possuem o mesmo domínio de estabilidade. As situações que podem ocorrer num sistema de potência que se enquadram no disposto acima, são:

- casos de curto numa barra com saída de uma mesma linha, mas com tempos de abertura diferentes;
- casos em que são simulados, um por vez, curtos nas barras que estão ligadas por uma dada linha, com a saída desta linha após a abertura do disjuntor. Por exemplo, seja a linha A-D, curto em A com saída de A-D e curto em D com saída de A-D são casos que possuem o mesmo domínio de estabilidade, por possuírem a mesma configuração pós-defeito com a retirada da linha A-D em ambos.

No segundo tipo o domínio de estabilidade é o mesmo para todos os casos envolvendo as duas barras com quaisquer tempos de abertura.

A terceira orientação, no sentido de otimização do uso do programa, está dirigida para a utilização de uma informação que está disponível, bastando um pequeno processamento adicional para se ter a análise de um novo caso completo. Para o primeiro tipo de situação, supondo que se tenha um tempo pré-terminado para abertura do disjuntor no caso a ser analisado. A inclusão de tempos menores de abertura na seqüência de casos não aumentará em nada o tempo de processamento. De outra forma a inclusão de casos com tempos maiores implicará apenas no gasto adicional para a complementação da integração numérica. Para o segundo tipo de situação, conhecido o domínio da análise de

estabilidade feita considerando o curto-circuito numa das barras, para se fazer o estudo no caso de curto-circuito na outra barra, é necessário que se faça, apenas, a integração numérica total ou parcial conforme a seqüência de casos se apresente.

A título de exemplo, seja o sistema de 5 barras, onde se deseja processar:

BARRAAC.C.	LINHA RETIRADA	TEMPO DE ABERTURA
1	1 - 2	6.0 ciclos
2	2 - 3	6.0 "
3	3 - 4	6.0 "
1	1 - 5	3.0 "
4	3 - 4	6.0 "

O exame dos casos a serem processados sugere que se pesquise as situações de curto na barra 2 e abertura da linha 1 - 2, curto na barra 3 e abertura da linha 2 - 3. Visto que a simulação de curto na barra 2 será feita no segundo caso, a simulação de curto na barra 3 será feita no terceiro caso, além disso o domínio de estabilidade para o sistema sem a linha 1 - 2 é calculado no primeiro caso e sem a linha 2 - 3 no segundo caso.

O processamento de casos com tempos de abertura menores que o estipulado inicialmente é sempre aconselhável, pois não implica em aumento do tempo de processamento e dá uma boa amostragem da evolução do sistema durante o defeito. Para tempos de abertura maiores existe apenas o tempo adicional de complementação da integração.

É apresentada a seguir uma seqüência sugestão que ilustra o ganho na qualidade de resposta do programa com a otimização sugerida:

CASO	B.C.C.	L.R.	TEMPO	OBS.:
1	1	1-5	1.5	Determina-se o D.E., integra-se até 1.5 ciclos;
2	1	1-5	3.0	Usa-se o D.E., obtido no caso 1, integra-se mais 1.5 ciclos;
3	1	1-2	3.0	Determina-se o D.E., não há necessidade de se processar integração numérica;
4	1	1-2	6.0	Usa-se o D.E. obtido no caso 3, integra-se mais 3 ciclos;
5	1	1-5	6.0	Usa-se o D.E. obtido no caso 1, não há necessidade de integração numérica;
6	1	1-2	9.0	Idem a obs. do caso 4;
7	2	2-3	3.0	Determina-se o D.E., integra-se até 3.0 ciclos;
8	2	2-1	3.0	Usa-se o D.E. obtido no caso 3, não há necessidade de integração numérica;
9	2	2-3	6.0	Usa-se o D.E. obtido no caso 7, integra-se mais 3 ciclos;
10	2	2-1	6.0	Idem a obs. do caso 8;
11	2	2-3	9.0	Idem a obs. do caso 9;
12	2	2-1	9.0	Idem a obs. do caso 8;
13	3	3-4	3.0	Determina-se o D.E., integra-se até 3 ciclos;
14	3	3-2	3.0	Usa-se o D.E. obtido no caso 7, não há necessidade de integração numérica;
15	3	3-4	6.0	Usa-se o D.E. obtido no caso 13, integra-se mais 3 ciclos;
16	3	3-2	6.0	Idem a obs. do caso 14;
17	3	3-4	9.0	Idem a obs. do caso 15;
18	3	3-2	9.0	Idem a obs. do caso 14;
19	4	3-4	3.0	Usa-se o D.E. obtido no caso 13, integra-se até 3 ciclos;
20	4	3-4	6.0	Usa-se o D.E. obtido no caso 13, integra-se mais 3 ciclos;
21	4	3-4	9.0	Idem a obs. do caso 20.

B.C.C. - Barra do curto-circuito

L.R. - Linha retirada

Em termos de tempo de processamento, considerando integração numérica e determinação do domínio de estabilidade, que são os dois procedimentos principais do programa, o tempo adicional para o processamento da seqüência sugestão é o gasto para a integração numérica de mais 3 ciclos de integração numérica para cada um dos casos da lista primitiva, ocorridos nos casos 6, 11, 17 e 21. Este tempo adicional não precisaria ser gasto. Isto aconteceria se as simulações se limitassem aos tempos de abertura da lista original, ou seja, 6 ciclos, mas com um pequeno tempo adicional de processamento obteve-se uma amostragem maior de 9 ciclos. Serão listados, abaixo, as vantagens obtidas usando a seqüência otimizada:

- Análise dos cinco casos solicitados com tempos de abertura de disjuntor intermediário, dentro do intervalo pré-estabelecido, sem tempo adicional considerável de processamento, casos 3, 4, 6, 7, 9, 13, 15, 1, 2, 19 e 20;
- análise completa de dois casos adicionais, curto na barra 2 com retirada da linha 1-2 e curto na barra 3 com retirada da linha 3-2. Foram usados tempos intermediários, sem tempo adicional considerável de processamento, casos 8, 10, 12, 14, 16 e 18;
- análise dos cinco casos originais mais os dois casos

adicionais para um tempo de abertura de mais 3 ciclos em relação ao da lista original, com um acréscimo de a penas 12 ciclos de integração numérica. Casos 6, 5, 11, 12, 17, 18 e 21;

- Para as vinte e uma situações analisadas foi necessário se determinar quatro domínios de estabilidade e fazer simulação de curto-circuito em quatro barras durante tempos de abertura de nove ciclos, o que é equivalente a se processar quatro casos independentemente.

3.11.3 - Sistema Controlador

Pode ser observado tanto na otimização do uso da integração numérica quanto na otimização do uso do domínio de estabilidade, a correlação existente entre casos, isto é, a dependência entre processamentos. Para fazer o controle computacional sobre a lista de casos a serem processados foi criado um sistema controlador, constituído de indicadores, que tem como atribuição principal fazer a conexão entre os casos da lista. A lista deve ser elaborada segundo as orientações indicadas nos itens anteriores. A conexão entre os casos é feita através dos indicadores que são definidos para cada um dos casos. Para cada caso os seus indicadores definem o processamento a ser executado, tendo em vista o uso de processamentos anteriores, o processamento complementar para a solução do caso e a dependência entre o mesmo e os casos seguintes da lista. A seguir são apresentados os indicadores que devem ser definidos para cada um dos casos:

IND1 - Muitas vezes o processamento de um caso termina sem que seja necessário a determinação do domínio de estabilidade, como visto em 3.4, mas pode ser que o domínio de estabilidade deste caso seja necessário para o processamento de um outro caso da lista que se está processando. Podem acontecer três situações; suponha que o caso para o qual se está definindo o indicador é um caso de curto em A com retirada da linha A-B, e que o tempo de simulação é de 2 ciclos. Tem-se, então:

a) um caso da lista em que tem-se curto em A e saída A-B, mas com um tempo de abertura de 4 ciclos. Este caso apresenta duas dependências de resultados com o caso para o qual se define o indicador:

- só será necessário processá-lo se o caso do indicador der como resultado estável. Se o caso é N.S.A. para um tempo de 2 ciclos, obrigatoriamente será N.S.A. para um tempo maior. Onde, N.S.A. é nada se afirma.
- no caso de ser processado, o domínio de estabilidade obtido no caso do indicador deve ser usado no processamento do mesmo.

Quando houver esta situação o indicador deve dar a informação de que A OBTENÇÃO DO D.E. SOMENTE É NECESSÁRIO SE O CASO PROCESSADO FOR ESTÁVEL. Computacionalmente, para efeitos de programa, o valor de IND1 é feito 1 (um).

b) um caso da lista em que tem-se curto em B e saída de A-B com qualquer tempo de simulação. A dependência entre os dois casos está no fato de o domínio de estabilidade ser o mesmo em ambos. Nesta circunstância o domínio de estabilidade do caso do indicador vai ser necessário para o processamento do caso aqui descrito, isto faz com que o indicador deva informar que O D.E. DEVE SER OBTIDO. Neste caso o valor de INDI é feito -1 (menos 1).

Quando existirem as duas situações a) e b), evidentemente, prevalece a indicação da opção b).

c) não existe na lista dos casos nenhuma das situações descritas acima. Neste caso o valor de INDI é feito 0 (zero).

IND2 - Este indicador visa minimizar o tempo de integração-gasto com a simulação do curto-circuito. Ela indica se existe dependência ou não do caso do indicador com o caso imediatamente anterior. Suponha que será processado um caso de curto-circuito em A, com retirada da linha A-B, e tempo de simulação 2 ciclos. Na lista de processamento poder-se-ia ter como caso imediatamente anterior, as seguintes situações:

a) um caso de curto-circuito em A com 2 ciclos de abertura, mas com a retirada da linha A-C. Evidente que por se tratar de curtos na mesma barra (barra A) e tempos de simulação idênticos, no processamento do caso do indicador pode se usar a simulação do caso anterior, sem necessidade de se fazer integração numérica para o caso. Este é o caso cuja característica é

que NÃO É NECESSÁRIO FAZER A SIMULAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO. Nesta situação o valor de IND2 é -1 (menos um).

b) um caso de curto-circuito em A com um tempo menor que 2 ciclos e abertura de qualquer linha ligada a A. Neste caso pode-se fazer a integração numérica a partir deste tempo, usando, portanto, a simulação feita no caso anterior, bastando complementá-la até os 2 ciclos do caso do indicador. Devido a este fato é que é necessário a colocação dos casos de curto-circuito em uma mesma barra juntos e classificados em ordem crescente de tempos de abertura na lista de casos.

Este é o caso em que o indicador deve informar que DEVE SER FEITA UMA COMPLEMENTAÇÃO DA SIMULAÇÃO. Neste caso o indicador IND2 deve ser colocado igual a 1 (um).

c) um terceiro caso que não se enquadra em a) ou b), é o caso de curto-circuito numa barra diferente do caso anterior. Neste caso o indicador deve informar que DEVE SER FEITA UMA SIMULAÇÃO COMPLETA. O valor de IND2 deve ser 0 (zero).

IND3 - Como visto na descrição do indicador IND1 o processamento de um caso pode ser cancelado devido ao resultado de outro. Este indicador é usado para indicar se existe esta dependência para o caso em questão com relação a um outro caso já processado. Este indicador é usado para casos idênticos quanto a barra do curto-circuito e a linha removida, mas com tempos de abertura diferentes. Um caso de 4 ciclos depende do resultado de 2 ciclos e um caso de 6 ciclos dependerá do resultado de 4 ciclos. Definem-se as seguintes situações:

a) o processamento do caso em questão depende do resultado obtido no caso N, já processado. Este é o caso em que EXISTE DEPENDÊNCIA DO RESULTADO DE UM PROCESSAMENTO ANTERIOR. Nesta situação o indicador IND3 é colocado com o valor de N, onde N é o número do caso sobre o qual existe a dependência.

b) um caso onde NÃO EXISTE DEPENDÊNCIA DO RESULTADO DE UM PROCESSAMENTO ANTERIOR. Neste caso IND3 é feito 0 (zero).

IND4 - Como mostrado em 3.5.2, existem casos em que o domínio de estabilidade obtido num caso pode ser aproveitado em outro. Este indicador serve para identificar ou não esta dependência para o caso em questão, como segue:

a) o caso a ser estudado vai usar o domínio de estabilidade obtido num caso N já processado. Neste caso NÃO É NECESSÁRIO DETERMINAR O DOMÍNIO DE ESTABILIDADE. O valor de IND4 deve ser feito igual a N, onde N é o número do caso do domínio de estabilidade usado.

b) não existe a possibilidade de se usar o domínio de estabilidade de um caso anterior, ENTÃO DEVE SER OBTIDO O DOMÍNIO DE ESTABILIDADE. O valor de IND4 deve ser feito igual a 0 (zero).

A combinação destes quatro indicadores permite que se faça um controle sobre a lista de processamento. Isto mais a construção da lista obedecendo as orientações indicadas em 3.5, otimizam o uso do programa, tanto no aspecto de velocida

de de processamento, como no aspecto de qualidade de resposta da análise desejada. O exemplo desenvolvido no item do capítulo seguinte será usado aqui para ilustrar o uso dos indicadores:

CASO	B.C.C.	L.A.	TEMPO	IND1	IND2	IND3	IND4
1	1	1-5	1.5	1	0	0	0
2	1	1-5	3.0	0	1	1	1
3	1	1-2	3.0	-1	-1	0	0
4	1	1-2	6.0	0	1	3	3
5	1	1-5	6.0	0	-1	2	1
66	1	1-2	9.0	0	1	4	3
7	2	2-3	3.0	-1	0	0	0
8	2	2-1	3.0	0	-1	0	3
9	2	2-3	6.0	0	1	7	7
10	2	2-1	6.0	0	-1	8	3
11	2	2-3	9.0	0	1	9	7
12	2	2-1	9.0	0	-1	10	3
13	3	3-4	3.0	-1	0	0	0
14	3	3-2	3.0	0	-1	0	7
15	3	3-4	6.0	0	1	13	13
16	3	3-2	6.0	0	-1	14	7
17	3	3-4	9.0	0	1	15	13
18	3	3-2	9.0	0	-1	16	7
19	4	3-4	3.0	0	0	0	13
20	4	3-4	6.0	0	1	19	13
21	4	3-4	9.0	0	1	20	13

3.12 - Conclusões

Neste capítulo foi apresentada uma discussão sobre a análise da estabilidade em sistemas de potência, detalhando-se as situações antes, durante e depois do defeito. Fazendo-se uso do algoritmo conceitual, desenvolvido em [6] , foi proposto um algoritmo computacional para a análise da estabilidade transitória de sistemas de potência, baseado no uso da função energia tomada como função de Liapunov. O uso das características das expressões envolvidas permite economia de tempo no processamento da inversão das matrizes, necessárias na redução às barras internas e no cálculo da tangência ao politopo.

Mostrou-se, também, que o uso de uma técnica adequada para a ordenação dos limites inferiores e o uso de uma cota superior diminuem bastante o esforço gasto na utilização da lista dos limites inferiores. Apresentou-se, ainda, uma descrição detalhada dos passos do algoritmo proposto e foram dadas indicações de como é possível proceder-se para ganho de eficiência, quando se processar a análise de um número grande de contingências.

No capítulo seguinte, são mostrados diversos exemplos que ilustram o uso do algoritmo proposto.

C A P Í T U L O I V

EXEMPLOS

4.1 - Introdução

Neste capítulo serão apresentados alguns exemplos para ilustração do algoritmo computacional proposto no capítulo anterior. Inicialmente, serão comentados alguns exemplos com 3 máquinas, que permitem uma visualização dos resultados. Um exemplo com 4 máquinas também é incluído, além de um caso com 10 máquinas onde a análise de um grande número de contingências é feita.

4.2 - Exemplo 1

São mostrados resultados obtidos para pequenos sistemas com 3 máquinas, no que diz respeito a obtenção de domínios de estabilidade. Devido à pequena dimensão do sistema foi possível obter os valores graficamente, a partir da plotagem das curvas de nível da função energia. Este procedimento permite visualizar os pontos de equilíbrio instáveis, os pontos de máximo e o politopo, tornando possível a obtenção dos domínios de estabilidade dados pelo ponto de sela, pelo método aproximado [13] e pelo método do Politopo.

Na figura 1, é mostrado um caso onde os domínios dados pelos três métodos é o mesmo (0.68). Para a obtenção destas curvas foram usados os seguintes dados:

$$\alpha_1^e = 30^\circ, \alpha_2^e = 30, B_{13} = 2, B_{23} = 1, \alpha_3^e = 0, \text{ sendo a máquina 3 a}$$

de referência. Observa-se que existem dois pontos de equilí
brio instáveis (0.68 e 1.37) (situações de perda de sincronismo
das máquinas 2 e 1, respectivamente).

Na figura 2, verifica-se um caso em que o domínio
dado pelo ponto de sela é ≈ 1.20 e o do método do politopo
 ≈ 1.17 . Pelo método aproximado, se consideradas todas as com
binações possíveis, conforme [13], teríamos ≈ 0.70 , corresponde
nte a perda de sincronismo das máquinas 1 e 2, valor este que
não poderia ser usado. Pela análise das curvas de nível a ex
pectativa de perda de sincronismo das duas máquinas, em conjunto,
está em torno do valor 2.77. No entanto, se forem consideradas
apenas as combinações entre os menores valores de ângulos ter-
se-ia um valor de ≈ 1.17 , igual ao do método do politopo.

Na figura 3, pelo ponto de sela o domínio é 1.44
unidades de energia, com o método do politopo obtem-se 1.37, com
o método aproximado com todas as combinações ≈ 2.84 e, somente
com os menores valores de ângulos, 0.62. Observa-se neste caso
que o método aproximado dá um valor conservativo em relação aos
demais métodos e que o mesmo (0.62) não está próximo de nenhum
ponto de equilíbrio instável. Na figura 4 foi usado o mesmo
sistema, porém trocando-se a referência. Observa-se que nos mê
todos do ponto de sela e do politopo tem-se os mesmos valores e
para o método aproximado, nesta ocasião, 1.61 valor otimista,
pertencendo a uma superfície de nível não fechada em relação ao
ponto de equilíbrio estável. Na figura 5, ainda para o mesmo
sistema, foi usada a terceira e última referência possível, en

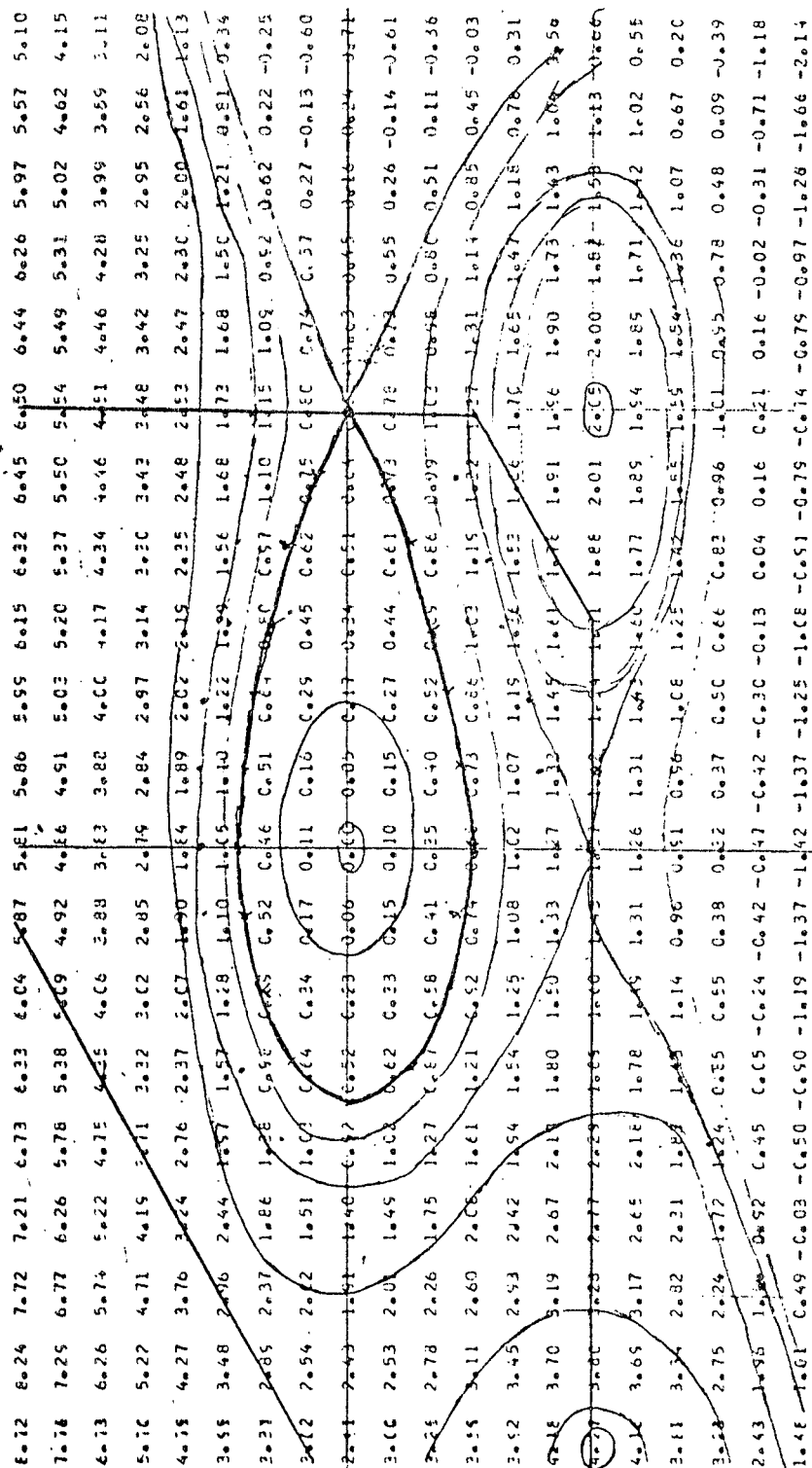


FIGURA 1 DADOS: $F_{13}=2$ $\alpha_1^e = 30^\circ$
 $F_{23}=1$ $\alpha_2^e = 30^\circ$

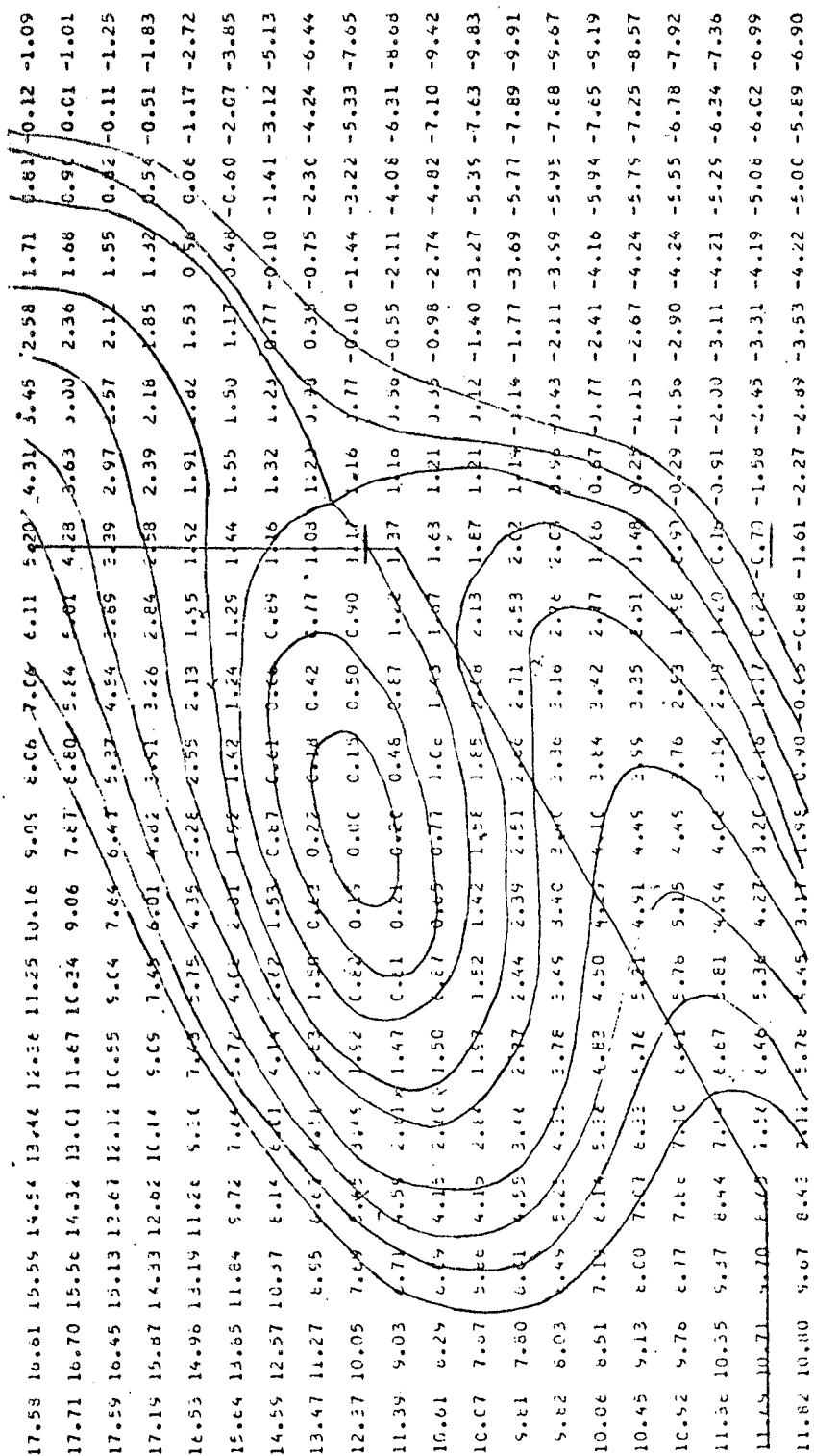


FIGURA 2 DADOS: $F_{12} = 2$ $\alpha_1^e = 10^\circ$

$F_{13} = 2$ $\alpha_2^e = 50^\circ$

$F_{23} = 2$

22.35	20.15	17.92	15.74	14.61	13.45	12.25	11.01	9.76	8.54	7.34	6.14	4.94	3.74	2.54	1.34	0.14	0.61	-1.04	-2.92	-4.68	-7.18
22.53	20.30	17.95	15.57	13.14	11.17	9.30	7.73	6.45	5.44	4.63	3.95	3.29	2.54	1.74	0.94	0.14	0.45	-1.01	-2.77	-4.60	-7.03
22.57	20.42	17.60	15.01	12.51	10.21	8.10	6.46	5.14	4.17	3.49	2.95	2.56	2.05	1.50	0.94	0.37	0.57	-0.57	-2.65	-4.76	-7.11
22.42	19.98	17.11	14.27	11.91	9.95	8.32	5.01	3.80	2.95	2.45	2.18	1.99	1.71	1.43	1.15	0.87	0.33	-0.56	-2.72	-4.51	-7.45
22.03	19.27	16.26	13.15	10.41	8.60	7.35	5.69	4.54	3.87	3.60	3.57	3.61	3.51	3.41	3.31	3.21	0.30	-1.04	-2.92	-5.30	-8.06
21.43	18.42	15.18	11.93	8.17	6.18	4.61	2.43	1.57	1.04	0.65	0.35	0.14	0.04	0.04	0.04	0.04	0.22	-1.24	-3.30	-5.51	-8.91
20.62	17.98	14.56	10.95	7.41	4.85	2.79	1.58	0.65	0.46	0.45	0.33	0.23	0.13	0.03	0.03	0.03	0.06	-1.58	-3.87	-6.71	-9.95
19.66	16.24	12.70	9.28	6.02	3.69	1.82	0.66	0.16	0.19	0.57	1.00	1.46	1.86	2.26	2.66	3.06	0.20	-2.07	-4.60	-7.67	-11.09
18.62	15.06	11.50	8.12	5.11	2.64	0.93	0.28	0.22	0.72	1.45	2.18	2.91	3.64	4.37	5.10	5.83	0.59	-2.70	-5.46	-8.71	-12.25
17.58	14.00	10.40	7.20	4.45	2.33	0.93	0.24	0.14	0.46	1.05	1.73	2.46	3.19	3.92	4.65	5.38	1.09	-3.44	-6.38	-9.75	-13.33
16.61	13.07	9.66	6.55	4.01	2.10	0.91	0.50	0.32	0.51	1.41	2.14	2.87	3.60	4.33	5.06	5.79	1.15	-4.24	-7.30	-10.72	-14.26
15.60	12.38	9.14	6.30	4.00	2.30	1.38	0.65	0.06	0.55	1.78	2.51	3.24	3.97	4.70	5.43	6.16	1.32	-5.05	-8.16	-11.53	-14.95
15.16	11.94	8.54	6.03	4.44	2.81	1.44	1.00	0.62	1.04	2.04	2.87	3.70	4.53	5.36	6.19	7.02	1.57	-5.84	-8.90	-12.15	-15.39
14.76	11.76	8.01	5.64	4.16	3.42	2.55	2.20	1.14	1.14	2.11	3.04	3.97	4.90	5.83	6.76	7.69	1.88	-6.54	-9.48	-12.55	-15.55
14.62	11.85	8.31	7.12	5.54	4.06	3.20	2.65	1.41	1.41	2.41	3.41	4.41	5.41	6.41	7.41	8.41	2.02	-1.68	-3.85	-6.54	-9.48
14.65	12.11	8.76	7.65	5.97	4.63	3.44	3.04	2.44	2.01	1.51	0.82	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	2.60	-0.68	-2.42	-4.59	-7.11
14.53	12.46	10.24	8.62	6.66	5.00	3.63	2.90	2.16	1.45	0.61	0.01	-1.00	-2.20	-3.30	-4.30	-5.30	3.60	-0.68	-2.42	-4.59	-7.11
15.05	12.86	10.67	8.60	6.44	5.07	3.66	2.91	1.94	0.89	-0.11	-0.85	-1.52	-2.19	-2.86	-3.53	-4.20	3.60	-0.68	-2.42	-4.59	-7.11
15.36	13.17	10.83	8.44	6.44	4.81	3.17	1.78	0.62	-0.35	-1.19	-2.00	-2.84	-3.62	-4.40	-5.18	-5.96	3.60	-0.68	-2.42	-4.59	-7.11
15.55	13.31	10.90	8.58	6.25	4.48	2.81	1.44	-0.54	-1.55	-2.35	-3.03	-3.70	-4.44	-5.18	-5.92	-6.66	3.60	-0.68	-2.42	-4.59	-7.11

FIGURA 3 DADOS: $F_{12} = 2$ $\alpha_1^e = 10^\circ$
 $F_{13} = 1$ $\alpha_2^e = 50^\circ$
 $F_{23} = 4$

2.75	4.58	6.01	7.01	7.59	7.81	7.80	7.68	7.61	7.73	8.16	8.99	10.25	11.93	13.96	16.24	18.62	20.95	23.09	24.92
1.93	3.24	5.31	6.31	6.85	7.00	6.88	6.64	6.45	6.46	6.82	7.60	8.87	10.59	12.70	15.08	17.58	20.03	22.28	24.18
1.15	3.10	4.57	5.53	5.99	6.03	5.79	5.44	5.14	5.08	5.39	6.18	7.48	9.28	11.50	14.00	16.61	19.17	21.49	23.44
0.45	2.40	3.84	4.71	5.06	4.99	4.63	4.17	3.80	3.69	4.01	4.84	6.22	8.12	10.46	13.07	15.80	18.43	20.79	22.74
-0.13	1.78	3.13	3.81	4.14	3.95	3.49	2.95	2.54	2.43	2.79	3.69	5.18	7.20	9.66	12.38	15.18	17.85	20.22	22.12
-0.56	1.27	2.52	3.17	3.29	2.99	2.45	1.87	1.45	1.41	1.83	2.84	4.45	6.59	9.14	11.94	14.78	17.46	19.78	21.61
-0.85	0.83	2.01	2.54	2.56	2.18	1.60	1.02	0.65	0.66	1.10	2.33	4.06	6.30	8.94	11.78	14.62	17.25	19.50	21.22
-1.09	0.51	1.62	2.05	1.99	1.57	0.95	0.46	0.15	0.28	0.91	2.18	4.01	6.33	9.01	11.85	14.65	17.21	19.35	20.95
-1.04	0.45	1.37	1.71	1.61	1.19	0.65	0.19	0.00	0.24	1.07	2.36	4.27	6.64	9.31	12.11	14.83	17.28	19.31	20.79
-1.01	0.37	1.20	1.51	1.41	1.03	0.57	0.22	0.14	0.50	1.38	2.81	4.76	7.12	9.76	12.48	15.09	17.43	19.33	20.71
-0.97	0.33	1.12	1.41	1.37	1.08	0.72	0.48	0.53	0.99	1.94	3.47	5.36	7.69	10.24	12.86	15.36	17.57	19.37	20.68
-0.56	0.30	1.09	1.44	1.48	1.26	1.03	0.91	1.06	1.50	2.59	4.66	5.97	8.22	10.67	13.17	15.55	17.66	19.38	20.64
-1.04	0.22	1.05	1.48	1.60	1.53	1.41	1.39	1.62	2.20	3.20	4.63	6.46	8.69	10.93	13.31	15.59	17.62	19.30	20.57
-1.24	0.06	0.97	1.51	1.74	1.79	1.78	1.84	2.11	2.69	3.64	5.00	6.72	8.74	10.96	13.23	15.43	17.42	19.10	20.41
-1.58	-0.20	0.81	1.47	1.82	1.97	2.04	2.14	2.41	2.95	3.83	5.07	6.68	8.53	10.69	12.89	15.05	17.04	18.76	20.14
-2.07	-0.59	0.54	1.32	1.78	2.01	2.11	2.21	2.44	2.90	3.65	4.81	6.25	8.09	10.13	12.28	14.44	16.47	18.27	19.76
-2.70	-1.09	0.15	1.03	1.57	1.84	1.94	2.01	2.16	2.51	3.17	4.18	5.56	7.29	9.28	11.43	13.63	15.74	17.64	19.25
-3.44	-1.71	-0.36	0.60	1.13	1.45	1.51	1.49	1.54	1.78	2.31	3.22	4.53	6.21	8.20	10.40	12.67	14.89	16.91	18.63
-4.24	-2.41	-0.98	0.02	0.60	0.83	0.81	0.69	0.62	0.74	1.17	2.00	3.28	4.94	6.99	9.25	11.63	13.96	16.11	17.94
-5.05	-3.15	-1.68	-0.68	-0.14	0.01	-0.11	-0.35	-0.54	-0.53	-0.17	0.62	1.88	3.67	5.71	8.09	10.59	13.04	15.29	17.20

FIGURA 4 DADOS: $F_{12} = 1$ $\alpha_1 e = -40^\circ$
 $F_{13} = 2$ $\alpha_2 e = +50^\circ$
 $F_{23} = 4$

28.14	27.34	26.33	25.95	23.40	21.61	19.50	17.21	14.83	12.48	10.24	8.22	6.46	5.00	3.83	2.90	2.16	1.49	0.81	0.01
28.16	27.19	25.87	24.17	22.12	19.78	17.25	14.65	12.11	9.76	7.69	5.97	4.63	3.64	2.95	2.44	2.01	1.51	0.83	-0.14
27.93	26.65	24.91	22.74	20.22	17.46	14.62	11.85	9.21	7.12	5.26	4.06	3.20	2.69	2.41	2.21	1.94	1.45	0.60	-0.68
27.25	25.65	23.44	20.79	17.85	14.78	11.78	9.01	6.64	4.76	3.42	2.59	2.20	2.11	2.14	2.11	1.84	1.18	0.02	-1.68
26.35	24.18	21.49	18.43	15.18	11.94	8.54	6.33	4.27	2.81	1.94	1.60	1.62	1.84	2.04	2.01	1.57	0.60	-0.98	-3.15
24.52	22.28	19.17	15.80	12.38	9.14	6.30	4.01	2.36	1.53	0.99	1.06	1.09	1.78	1.57	1.78	1.03	-0.36	-2.41	-5.05
23.09	20.03	16.61	13.07	9.66	6.59	4.06	2.19	1.01	0.50	0.53	0.91	1.41	1.79	1.82	1.32	0.15	-1.71	-4.24	-7.30
22.55	17.58	14.00	10.46	7.20	4.45	2.33	0.93	0.24	0.14	0.43	1.03	1.63	1.74	1.47	0.54	-1.09	-3.44	-6.38	-9.75
13.62	15.08	11.50	8.12	5.18	2.84	1.20	0.28	0.00	0.22	0.72	1.28	1.80	1.51	0.81	-0.59	-2.70	-5.46	-8.71	-12.25
16.24	12.70	9.28	6.22	3.69	1.73	0.66	0.16	0.19	0.57	1.00	1.68	1.98	0.97	-0.20	-2.07	-4.60	-7.67	-11.09	-14.63
13.56	10.59	7.48	4.84	2.79	1.40	0.65	0.46	0.65	1.03	1.57	1.74	1.05	0.06	-1.58	-3.87	-6.71	-9.95	-13.37	-16.74
11.53	8.97	6.18	4.71	2.43	1.00	1.02	0.99	1.19	1.71	1.44	1.09	0.72	-1.24	-3.30	-5.91	-8.91	-12.15	-15.40	-18.46
10.25	7.60	5.39	3.55	2.54	1.67	1.60	1.57	1.61	1.51	1.12	0.30	-1.04	-2.92	-5.30	-8.06	-11.07	-14.14	-17.08	-19.73
9.99	6.82	5.03	3.80	2.95	2.45	2.18	1.75	1.71	1.20	0.33	-0.56	-2.72	-4.91	-7.45	-10.22	-13.06	-15.82	-18.34	-20.51
8.16	6.46	5.14	4.17	3.44	2.99	2.56	2.05	1.36	0.37	-0.97	-2.69	-4.76	-7.11	-9.65	-12.25	-14.78	-17.12	-19.17	-20.87
7.73	6.45	5.44	4.43	3.25	2.79	2.54	1.62	0.45	-1.01	-2.77	-4.80	-7.03	-9.39	-11.76	-14.05	-16.16	-18.03	-19.61	-20.88
7.61	6.64	5.79	4.99	4.14	3.17	2.01	0.61	-1.04	-2.92	-4.98	-7.18	-9.41	-11.60	-13.66	-15.54	-17.19	-18.57	-19.72	-20.69
7.68	6.88	6.03	5.76	3.91	2.52	0.68	-1.00	-3.06	-5.25	-7.48	-9.67	-11.74	-13.62	-15.27	-16.67	-17.83	-18.80	-19.65	-20.45
7.60	7.00	5.99	4.71	3.13	1.27	-0.85	-3.14	-5.51	-7.97	-10.10	-12.13	-13.89	-15.35	-16.52	-17.44	-18.19	-18.85	-19.53	-20.33
7.81	6.95	5.53	3.83	1.78	-0.56	-3.09	-5.69	-8.23	-10.59	-12.66	-14.37	-15.71	-16.70	-17.40	-17.90	-18.34	-18.83	-19.52	-20.48

FIGURA 5 DADOS: F₁₂ = 4 α₁e = -10°
 F₁₃ = 1 α₂e = 40°
 F₂₃ = 2

contrando-se o valor de -9.39 para todas as combinações e 0.45 para os menores valores, pelo método aproximado.

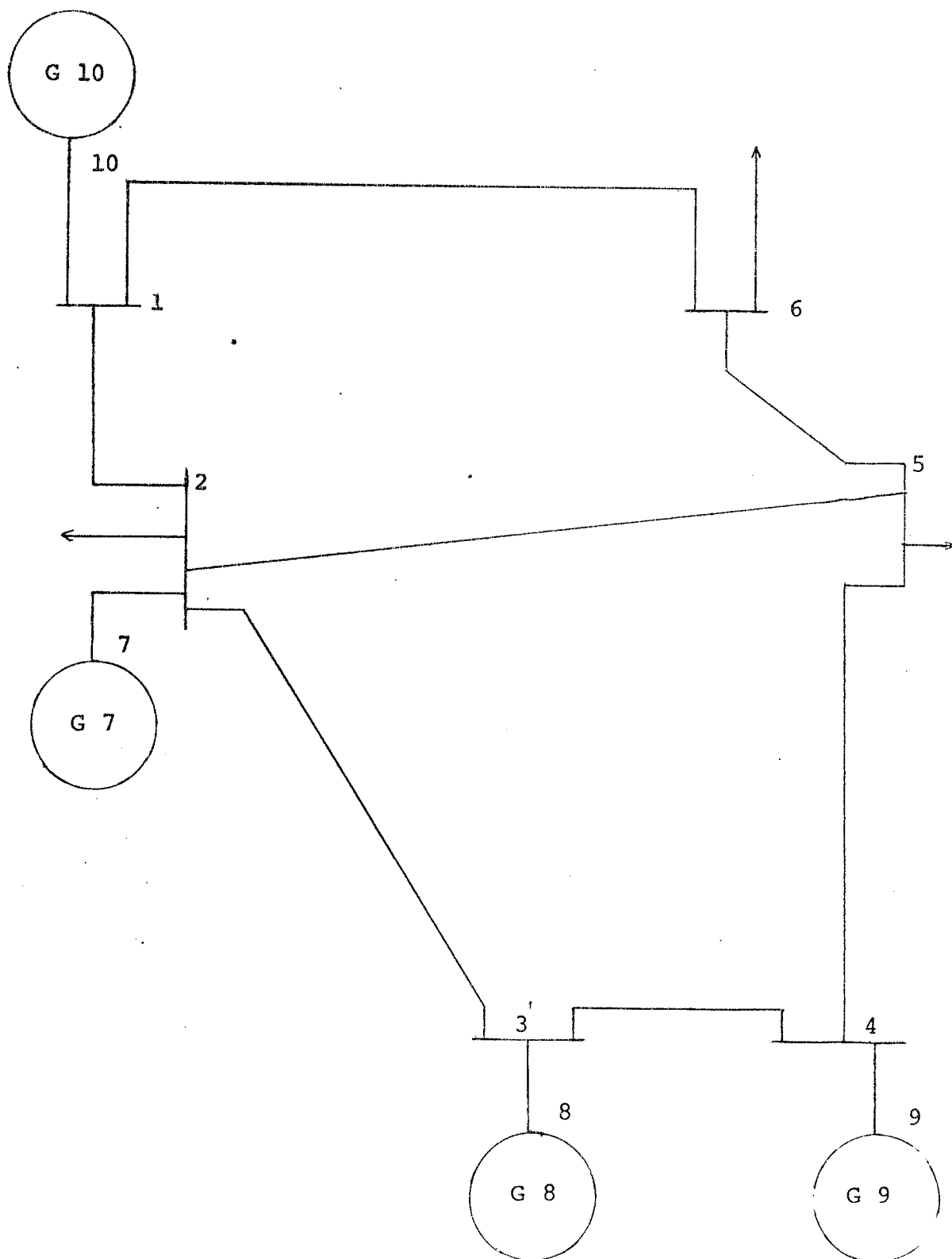


Figura 6 - Exemplo 2

4.3 - Exemplo 2

Foi usado a seguir um sistema conhecido na literatura (2), sobre o qual foi testado o método aproximado [13]. É um sistema de 10 barras, 4 gerações e 7 linhas, conforme figura 6 e tabelas 1, 2, 3 e 4. Os resultados obtidos são listados na tabela 5.

Verificou-se nestes casos uma boa aderência entre os resultados do método do politopo e o método aproximado, sendo os do primeiro um pouco conservativos em relação aos do segundo. Foi usada a mesma referência de [13], e não foi possível obter os pontos de sela pelas dificuldades já conhecidas de convergência.

TABELA I - DADOS DE LINHA

LINHA		IMPEDÂNCIA	
DE	PARA	R	X
1	2	0.05	0.20
2	3	0.10	0.50
3	4	0.20	0.80
4	5	0.10	0.30
5	6	0.20	0.40
6	1	0.10	0.15
2	5	0.20	0.50

TABELA II - DADOS DE MÁQUINA

GERADOR	BARRA	MVA	M pu	X _d pu	D pu
10	1	100	75 350	0.004	1.0
7	2	15	1 130	1.000	12.0
8	3	40	2 260	0.500	2.5
9	4	30	1 508	0.400	6.0

TABELA III - DADOS DE CARGA

BARRA	CARGAS	
	P em mW	Q em Mvar
2	- 20	10
5	- 40	15
6	- 30	10

TABELA IV - DADOS DE GERAÇÃO E CONDIÇÕES
INICIAIS PRÉ-FALTA

BARRA	E	Graus	P _G , mW	Q _G , Mvar	P _L , mW	Q _L , Mvar
1	1.000	0.0	33.2	9.1	0.0	0.0
2	1.002	-0.12	10.0	5.0	20.0	10.0
3	1.084	4.62	+30.0	20.0	0.0	0.0
4	1.025	1.41	+20.0	10.0	0.0	0.0
5	0.956	-2.80	0.0	0.0	40.0	15.0
6	0.953	-2.30	0.0	0.0	30.0	10.0

TABELA V - DOMÍNIO DE ESTABILIDADE EM UNIDADES
DE ENERGIA - CASO 4 MÁQUINAS

CONTINGÊNCIA			DOMÍNIO	
			POLITOPPO	PRAB.
BARRA 1	x	BARRA 2	1.1678	1.3656
BARRA 2	x	BARRA 3	0.5439	0.5686
BARRA 2	x	BARRA 5	1.4684	1.4723
BARRA 4	x	BARRA 5	0.6387	0.7540
BARRA 3	x	BARRA 4	1.0199	1.3236

4.4 - Exemplo 3

Para ilustrar a utilização do algoritmo desenvolvido de modo completo, fez-se uso de um sistema com 10 máquinas, 45 barras e 72 linhas cujo grafo é semelhante ao grafo do sistema elétrico do Sul do Brasil a menos de algumas modificações. Foram desprezados os amortecimentos e fez-se então uso do modelo (2.5).

Na figura 7 é apresentado o grafo e nas tabelas 6, 7 e 8 são mostrados os dados deste sistema. Na tabela 9 são apresentados os resultados da análise de 70 situações.

Na 2^a coluna é indicado a barra onde ocorreu o curto, na 3^a coluna é dada o nome da barra que especifica a linha retirada para eliminação do defeito, na 4^a coluna é especificado o tempo de duração do curto, na 5^a o valor do domínio de estabilidade encontrado, na 6^a o valor da função de Liapunov calculado no estado correspondente ao instante em que é retirado o defeito (condição inicial pós-defeito) e na última coluna o resultado se estável ou se nada se pode afirmar.

Nos casos 26 a 35, 41 a 45 e 65 a 70, a condição inicial pós-defeito forneceu um valor de energia maior que a cota superior calculada e portanto, dado que o segundo método de Liapunov fornece apenas condições suficientes, nada se pode afirmar sobre a estabilidade. Estes casos são então candidatos a um estudo por meio do procedimento usual por meio de métodos numéricos.

Os casos 30 e 40, 46 a 50, 56 a 58, 60 e 61, 63 e 64 constituem situações onde nada se afirma mas foram detectadas com o uso do domínio de estabilidade. Serão, portanto, situações menos críticas que aquelas indicadas nos casos mencionados acima. O caso 56 foi simulado, por métodos numéricos, com 6 ciclos de duração de defeito e foi verificado ser instável.

O caso 36 foi analisado para 1 1/2, 3, 6, 9 e 12 ciclos. Nas três primeiras situações foi observada estabilidade e para 9 ciclos nada se pode afirmar. Este caso também foi analisado por métodos numéricos e foi verificado que ainda com 9 ciclos o sistema era estável.

O caso 59 foi dado como estável para 6 ciclos de duração de defeito e nada se afirma para 9 ciclos. A simulação por métodos numéricos também indicou instabilidade na mesma situação.

A determinação da estabilidade no caso de 6 ciclos de duração de defeito, com uso do domínio de estabilidade dado pelo procedimento apresentado, consome 40 segundos de C.P.U., quando o passo de integração durante defeito é de 0.001. Na mesma situação o uso de métodos numéricos, considerando 1, 1.1 e 1.2 segundos de integração pós-defeito o tempo de computação foi de 5'16", 6'22" e 7'45", respectivamente. Considerando-se então a análise dos 70 casos acima, o tempo de computação seria da ordem de aproximadamente 7 horas sem contar o tempo da análise das curvas. Se cada caso fosse analisado separadamente pelo 2º método de Liapunov conforme proposto, ter-se-ia um tem

po aproximado de 0,78 horas. No entanto, se a entrada dos ca
sos é preparada na ordem apresentada na tabela 8, e evita-se a
repetição de cálculo, conforme proposto, o tempo de computação
pode ser reduzido. No caso do exemplo apresentado, as 70 situa
ções foram analisadas em cerca de 6 minutos de computação (0,1
horas).

Algumas informações adicionais podem ser obtidas
dos resultados fornecidos. No caso 36, por exemplo, a condição
inicial pós-defeito é dada na saída do programa e pode ser usa
da como condição inicial para o procedimento numérico de inte
gração durante defeito na análise por método numérico. Esta si
tuação indica também que o tempo crítico de retirada de defeito
é maior ou igual a 6 ciclos.

NUMERO	N O M E	GERAÇÃO (MW)	CARGA (MW)
366	BARRAÇÃO.13.8	650.00	0.00
367	SIDERÓPOLIS.230	0.00	177.00
368	FARROUPILHA.230	0.00	190.70
369	P. FUNDO.13.8	215.00	0.00
370	P. FUNDO.230	0.00	171.00
371	XANXERÊ.230	0.00	126.00
372	P.BRANCO.230	0.00	46.00
373	S.OSÓRIO.13.8	1050.00	0.00
374	S.OSÓRIO.230	0.00	280.60
375	AREIA.230	0.00	279.00
376	S. MATEUS.230	0.00	130.00
377	CURITIBA.230	0.00	427.00
378	JOIVILLE.230	0.00	310.00
379	BLUMENAU.230	0.00	424.00
380	RANCHO QUEIMADO.230	0.00	117.00
381	F.AREIA.13.8	1110.00	0.00
382	AREIA.525	0.00	0.00
383	CURITIBA.525	0.00	0.00
384	CURITIBA-NORTE.525	0.00	367.60
385	BLUMENAU.525	0.00	0.00
386	BARRAÇÃO.525	0.00	174.00
387	GRAVATAÍ.525	0.00	0.00
388	V.AIRES.525	0.00	0.00
389	PINHEIRO.525	0.00	0.00
390	S. SANTIAGO.13.8	1325.00	0.00
391	S. SANTIAGO.525	0.00	0.00
392	J.LACERDA.A.13.8	90.00	0.00
393	J. LACERDA.138	0.00	126.00
394	J. LACERDA.B.13.8	120.00	0.00
395	J. LACERDA.C.13.8	241.00	0.00
396	J. LACERDA.230	0.00	0.00
397	SEGREDO.13.8	0.00	0.00
398	SEGREDO.525	0.00	0.00
399	CECI.230	0.00	813.00
402	GRAVATAÍ.230	0.00	612.00
407	ITAÛBA.13.8	490.00	0.00
408	ITAÛBA.230	0.00	403.60
414	V.AIRES.230	0.00	393.30
430	APUCARANA.230	0.00	262.00
431	LONDRINA.230	0.00	229.00
432	MARINGÁ.230	0.00	184.00
433	C. MOURÃO.230	0.00	139.00
437	FORQUILHINHA.230	0.00	90.10
343	IVAIPORÃ.525	0.00	0.00
344	LONDRINA.525	0.00	0.00

TABELA 6 - Dados de barras

BARRA	BARRA	R%	X%	B (MVA)	BARRA	BARRA	R%	X%	B (MVA)
386	366	0.00	1.36	0.00	377	383	0.00	0.62	0.00
367	368	3.86	19.85	34.00	379	385	0.00	0.62	0.00
367	396	0.96	4.91	8.42	386	387	0.21	3.09	371.83
367	437	0.33	1.67	28.59	386	382	0.14	1.95	239.68
368	370	4.63	23.78	40.84	402	387	0.00	0.62	0.00
368	370	4.63	27.78	40.84	388	389	0.22	3.00	383.00
368	399	1.77	9.10	15.85	414	388	0.00	0.62	0.00
368	399	1.77	9.10	15.85	489	391	0.14	1.95	239.70
370	369	0.00	4.60	0.00	491	390	0.00	1.14	0.00
371	370	1.63	8.35	14.40	391	343	0.14	2.04	244.75
371	370	1.63	8.35	14.40	391	398	0.05	0.70	83.92
371	372	1.63	8.35	14.40	393	392	0.00	8.71	0.00
371	374	3.16	16.21	27.84	393	396	0.00	5.90	0.00
372	372	1.53	8.61	13.44	396	394	0.00	7.01	0.00
374	373	0.00	1.14	0.00	396	395	0.00	4.50	0.00
374	375	3.06	15.23	27.02	396	437	0.29	6.57	11.28
374	433	3.44	17.60	30.40	398	397	0.00	0.68	0.00
374	433	3.44	17.60	30.40	399	402	0.22	1.11	2.32
375	376	2.45	12.56	20.41	399	402	0.22	1.11	2.32
376	377	0.88	4.15	52.11	399	402	0.22	1.11	2.32
377	378	1.82	9.35	15.95	399	414	2.07	9.33	17.18
377	378	1.82	9.35	15.95	399	414	1.68	9.30	17.20
378	379	1.54	7.76	13.50	399	414	1.76	9.84	17.98
378	379	1.54	7.76	13.50	399	368	1.77	9.10	15.85
379	380	2.16	11.05	18.63	408	407	1.00	2.36	0.00
379	380	2.16	11.05	18.63	408	414	2.02	11.29	20.62
380	396	1.80	9.20	15.53	430	433	2.29	11.74	20.27
380	396	1.80	9.20	15.53	430	432	1.10	11.84	20.27
382	381	0.00	0.67	0.00	430	431	1.25	6.41	11.09
382	383	0.19	2.80	335.76	430	431	0.89	4.61	7.96
382	384	0.19	2.74	328.67	431	432	1.72	8.84	14.34
382	398	0.05	0.70	83.92	431	432	1.72	8.82	14.34
382	343	0.18	2.27	227.21	432	433	1.81	9.29	16.07
382	375	0.00	3.00	0.00	343	344	0.07	1.45	166.10
383	384	0.05	0.69	82.16	343	344	0.07	1.45	166.10
383	385	0.12	1.75	209.70	344	431	0.00	0.63	0.00

TABELA 7 - Dados de linhas

BARRA	N O M E	x'd (pu)	H (MWS/MVA)
366	BARRACÃO-13.8	0.0367	30.44
369	P. FUNDO-13.8	0.1039	10.56
373	S. OSÓRIO-13.8	0.0284	38.34
381	F. AREIA-13.8	0.0241	62.25
390	S. SANTIAGO-13.8	0.0243	55.24
392	J. LACERDA.A-13.8	0.1352	4.37
394	J. LACERDA.B-13.8	0.1534	6.80
395	J. LACERDA.C-13.8	0.0800	12.50
397	SEGREDO	0.0216	62.46
407	ITAUBA	0.0432	20.24

TABELA 8 - Dados de Máquinas

Nº	CURTO	SAÍDA	TEMPO(CICLOS)	DOMÍNIO	ENERGIA	RESULTADO
01	F. AREIA	S. OSORIO	1.5	0.6883	0.0478	ESTÁVEL
02	"	"	3.0	-	0.0639	"
03	"	"	6.0	-	0.1268	"
04	"	"	9.0	-	0.2275	"
05	"	"	12.0	-	0.3593	"
06	F. AREIA	BARRACÃO	1.5	0.9110	0.4414	ESTÁVEL
07	"	"	3.0	-	0.4594	"
08	"	"	6.0	-	0.5292	"
09	"	"	9.0	-	0.6391	"
10	"	"	12.0	-	0.7798	"
11	F. AREIA	IVAIPORÁ	1.5	1.1142	0.0057	ESTÁVEL
12	"	"	3.0	-	0.0224	"
13	"	"	6.0	-	0.0874	"
14	"	"	9.0	-	0.1916	"
15	"	"	12.0	-	0.3279	"
16	F. AREIA	CURITIBA	1.5	0.6056	0.0378	ESTÁVEL
17	"	"	3.0	-	0.0506	"
18	"	"	6.0	-	0.1001	"
19	"	"	9.0	-	0.1781	"
20	"	"	12.0	-	0.2779	"
21	F. AREIA	CURIT.NORTE	1.5	0.7019	0.0260	ESTÁVEL
22	"	"	3.0	-	0.0395	"
23	"	"	6.0	-	0.0917	"
24	"	"	9.0	-	0.1745	"
25	"	"	12.0	-	0.2809	"
26	F. AREIA	SEGREDO	1.5	-	1.0297	NSA ¹ - CS ²
27	"	"	3.0	-	-	"
28	"	"	6.0	-	-	"
29	"	"	9.0	-	-	"
30	"	"	12.0	-	-	"
31	BARRACÃO	GRAVATAÍ	1.5	-	0.7468	"
32	"	"	3.0	-	-	"
33	"	"	6.0	-	-	"
34	"	"	9.0	-	-	"
35	"	"	12.0	-	-	"
36	V. AIRES	PINHEIRO	1.5	0.6360	0.3990	ESTÁVEL
37	"	"	3.0	-	0.4233	"
38	"	"	6.0	-	0.5185	"
39	"	"	9.0	-	0.6697	NSA - EST ³
40	"	"	12.0	-	-	"
41	ITAUBA	V. AIRES	1.5	0.2024	0.4176	NSA - CS*
42	"	"	3.0	-	-	"
43	"	"	6.0	-	-	"
44	"	"	9.0	-	-	"
45	"	"	12.0	-	-	"
46	V. AIRES	ITAUBA	1.5	0.2024	0.4897	NSA *
47	"	"	3.0	-	-	"
48	"	"	6.0	-	-	"
49	"	"	9.0	-	-	"
50	"	"	12.0	-	-	"
51	P. FUNDO	FARROUPILHA	1.5	1.0946	0.0098	ESTÁVEL
52	"	"	3.0	-	0.0370	"
53	"	"	6.0	-	0.1463	"
54	"	"	9.0	-	0.3317	"

TABELA 9 - Resultados Obtidos

Nº	CURTO	SAÍDA	TEMPO(CICLOS)	DOMÍNIO	ENERGIA	RESULTADO
55	P. FUNDO	FARROUPILHA	12.0	1.0946	0.5978	ESTÁVEL
56	S. OSÓRIO	AREIA	6.0	0.6883	0.7723	NSA - IMN ⁴
57	"	"	9.0	-	-	"
58	"	"	12.0	-	-	"
59	S. OSÓRIO	XANXERÊ	6.0	0.9268	0.7309	ESTÁVEL
60	"	"	9.0	-	1.7407	NSA - IMN
61	"	"	12.0	-	-	"
62	S. OSÓRIO	C. MOURÃO	6.0	0.9408	0.7343	ESTÁVEL
63	"	"	9.0	-	1.7672	NSA
64	"	"	12.0	-	-	"
65	S.SANTIAGO	PINHEIRO	9.0	-	1.3368	NSA - CS
66	"	"	12.0	-	-	"
67	S.SANTIAGO	IVAIPORÃ	9.0	-	1.1391	NSA - CS
68	"	"	12.0	-	-	"
69	S.SANTIAGO	SEGREDO	9.0	-	1.2057	NSA - CS
70	"	"	12.0	-	-	"

TABELA 9 - Resultados Obtidos (continuação)

- (1) - NSA - Nada se Afirma
(2) - CS - Cota Superior
(3) - EST - Estável por Métodos Numéricos
(4) - IMN - Instável por Métodos Numéricos

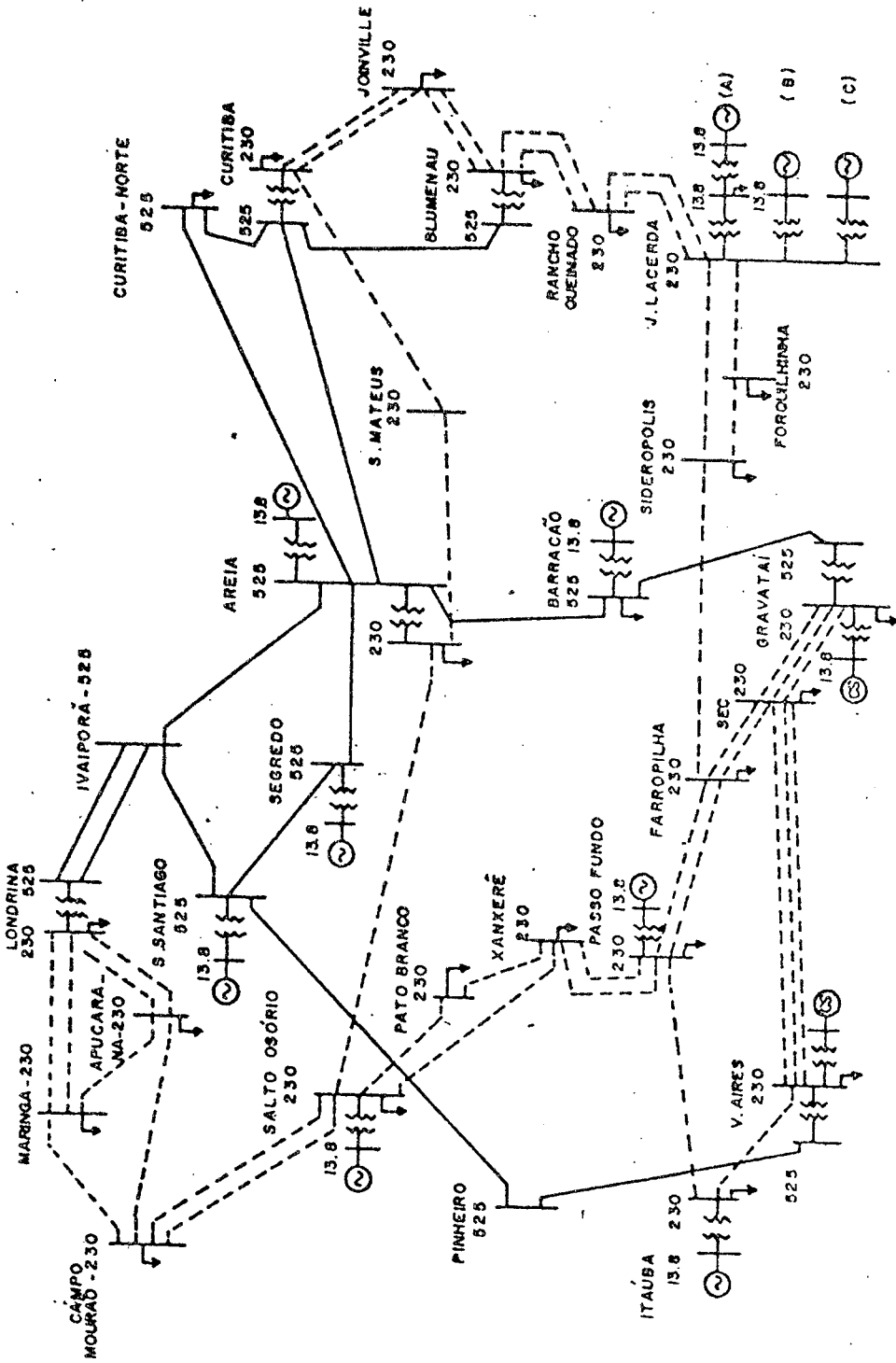


Figura 7 - Diagrama Unifilar do Sistema

4.5 - Conclusões

Neste capítulo foram apresentados alguns exemplos para ilustração da utilização do algoritmo computacional proposto. Os primeiros exemplos de 3 máquinas foram incluídos para visualização dos resultados que se obtém com o procedimento do método do politopo. Os resultados obtidos nos exemplos 1 e 2 mostram que, no caso do método de cálculo do domínio pelo ponto de sela e pelo politopo, o valor da energia correspondente ao domínio são próximos, com o valor dado pelo método do politopo sempre menor ou igual ao ponto de sela e independente da referência escolhida conforme no caso do método aproximado [13]. O exemplo 3 fez uso de um sistema de potência com 10 máquinas, 45 barras e 72 linhas para o qual foram propostas 70 contingências envolvendo curtos e desligamentos de linhas para eliminação dos curtos. Dos casos analisados, 50% são estáveis sem necessidade de considerações adicionais. Sobre o restante dos casos nada se pode afirmar.

Os domínios de estabilidade podem ainda ser usados para seleção de casos mais críticos fazendo-se uso de um índice baseado no valor da energia no instante em que cessa o defeito e no valor da energia correspondente ao domínio.

C A P Í T U L O V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - Conclusões e Recomendações

Um grande número de trabalhos tem sido realizado recentemente na área de estabilidade transitória em sistemas de potência, utilizando o segundo método de Liapunov. Neste sentido, conforme exposto no capítulo 2, diversos autores têm desenvolvido e apresentado funções de Liapunov para sistemas de potência com máquinas e sugerido procedimentos para a determinação de domínios de estabilidade. Estes procedimentos apresentam, como principal vantagem, a possibilidade de se decidir sobre estabilidade ou não se afirmar sem a intervenção de especialistas para análise de soluções das equações, ao contrário do método tradicional de simulação das equações diferenciais.

As funções mais usadas envolvem a determinação da energia do sistema e, através do ponto de equilíbrio instável com menor energia potencial, podem fornecer um domínio de estabilidade. No entanto, conforme mencionado, não se dispõe ainda de um método eficiente e geral que forneça este ponto de equilíbrio instável.

O método do politopo ([4,6,12]), proposto recentemente, é da mesma natureza e, embora forneça um resultado um pouco conservativo em relação ao ponto de equilíbrio instável

com menor energia potencial, fornece um domínio de estabilidade se o ponto de equilíbrio estável em análise pertence à região L.

A partir do algoritmo conceitual proposto em [4,6,12] este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo computacional para a determinação de domínios de estabilidade para sistemas de potência de grande porte.

Este algoritmo, conforme desenvolvido, faz uso de técnicas de esparsidade e apresenta a redução de Kron calculada através da solução de equações lineares. Foram ainda introduzidos o uso da condição de que o estado inicial pós-defeito seja um ponto de L_2 e o uso de uma cota superior como regras de parada para os casos em que nada se afirma. As subrotinas foram preparadas de forma a evitar a repetição de cálculos e, com isso, uma considerável redução de tempo de computação é obtida, quando tem-se que testar muitas situações. Um exemplo é apresentado com a análise de 70 situações que foram testadas em um tempo de 6 minutos de computação.

Conforme ilustrado pelo exemplo de 10 máquinas, se os casos em que nada se pode afirmar fossem considerados instáveis, o resultado estaria do lado da segurança. Nesta situação, o algoritmo desenvolvido poderia ser utilizado como subrotina de teste de estabilidade transitória em problemas de planejamento de transmissão, ou para gerar índices de segurança baseado nas diferenças entre a energia calculada na condição inicial pós-defeito e a energia correspondente ao domínio de estabilidade. Estes índices podem ser usados em análise de contingências,

em problemas de planejamento e em problemas de operação de sistemas de potência.

A prática adquirida com o algoritmo desenvolvido evidenciou alguns pontos que merecem atenção.

Entre estes, observa-se que o método do polítopo e mesmo aquele que usa o ponto de sela, isto é, o ponto instável com menor energia potencial, não fornecem um domínio de estabilidade exato. Neste caso, uma infinidade de condições iniciais ficam excluídas do domínio calculado. Para sua inclusão pode-se, conforme [12], associar um método de integração numérica de equações diferenciais utilizando-se, por exemplo, a saída do polítopo L_2 ou a entrada da trajetória das equações no domínio de estabilidade como regra de parada.

O aumento do número de máquinas implica no aumento da dimensão do espaço de estados e conseqüentemente, no número de faces do polítopo. Assim, a obtenção de um método ou regra de parada que utilize o mínimo possível de faces é desejável. Em situações onde não houver necessidade de uma precisão grande, como no caso de estudo de cenários em planejamento, pode-se estabelecer um número de faces a serem usadas, dependente do número de variáveis de estado ou mesmo usar como domínio aquele correspondente ao menor limite inferior. A conservatividade relativa do domínio obtido pelo método do polítopo, fornece uma certa margem de segurança que permitira, nas situações acima, o uso do domínio assim obtido.

Na redução às barras internas, conforme usado na

literatura e neste trabalho, pressupõe-se a desconsideração das condutâncias de transferência no sistema reduzido. Sabe-se que isto acarreta algum erro e deve ser contornado. Em [21] é sugerida a consideração de cargas dependentes da frequência e proposto um modelo que admite uma função de Liapunov tipo energia. O método do politopo e o programa desenvolvido podem ser exten
didos a este modelo que permite uma interpretação física dos li
mites inferiores e indicações de uma margem de segurança direta
mente no grafo original do sistema.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - KIMBARK, E.W. - "Power Systems Stability-Synchronous Machines" - Vol. 3, Dover Publications, Inc., N.Y. 1956
- 2 - EL-ABIAD, A.H. and NAGAPPAN, K - "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems" - IEEE Trans. App. Syst., vol. PAS-85, nº2, Feb. 1966, pg.169 a 179
- 3 - GLESS, G.E. - "Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability" - IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-85 nº2, Feb. 1966, pg.159 a 168
- 4 - DORAISWAMI, R.; FONSECA, L.G.S.- "A Fast and Reliable Determination of Dominion of Transient Stability for Multimachine Power System"-IEEE POWER WINTER MEETING, Jan. 1978
- 5 - FONSECA, LGS/outros - "Determinação de Situações Críticas de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência de Grande Porte" - V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 11/1979.
- 6 - FONSECA, L.G.S. - "Determinação de Domínios de Estabilidade para uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência" Tese de D.Sc - COPPE, UFRJ, 1976
- 7 - TAVORA, C.J. and SMITH, O.J.M. - "Characterization of Equilibrium and Stability in Power Systems" - IEEE Trans. Power App. Systems, vol. PAS-91, nº 3, May-Jun 1972, pg: 1127 a 1130.
- 8 - TAVORA, C.J. and SMITH, O.J.M. - "Stability Analysis of Power Systems" -IEEE Trans. Power App. Systems, vol. PAS-91, nº 3, May-Jun 1972, pp. 1138 a 1144.
- 9 - HAHN, W. - "Stability of Motion" - Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, N.Y., 1967

- 10 - RIBBENS-PAVELLA, M. - "Comments on Direct Methods for Transient Stability Studies in Power Systems Analysis" IEEE Trans. on Aut. Control, Jun 1972, pp.415-416
- 11 - TAVORA, C.J. and SMITH, O.J.M. - "Equilibrium Analysis of Power Systems" - IEEE Trans. Power App. Systems, vol. 91, nº 3, May-Jun 1972, pg 1131 a 1137
- 12 - FONSECA, L.G.S.; COGO, J.R.; DORENSTEIN, C.R. - "Determinação de Domínios de Estabilidade Assintótica para Sistemas de Potência com n-Máquinas" - IIº Congresso Brasileiro de Automática, UFSC-Fpölis., S.C.-Set 1978
- 13 - PRABHAKARA, F.S. and EL-Abiad, A.H. - "A Simplified Determination of Transient Stability Regions for Lyapunov Methods" - IEEE Trans. Power App. Systems, vol. PAS-94, nº 2, Mar-Apr 1975, pg. 672 a 689
- 14 - LUDERS, G.A. - "Transient Stability of Multimachine Power Systems via the Direct Method of Lyapunov" - IEEE Trans. Power App. Syst., Jan/Feb. 1971, pg 23 a 36
- 15 - AYLETT, P.D. - "The Energy-Integral Criterion of Transient Stability Limits of Power Systems" - The Inst. of Elet. Eng., IEEE- July 1958, pg. 527 a 536
- 16 - MAGNUSSON, P.C. - "The Transient Energy Method of Calculating Stability" - AIEE Trans.Vol.66, 1947,pg.747-755
- 17 - GUPTA, C.L. and EL-ABIAD, A.H. - "Determination of the Closest Unstable Equilibrium State for Liapunov Methods in Transient Stability Studies" - IEEE Trans.Power App. Syst., Sep-Oct 1975 pg. 1669 a 1712.
- 18 - RIBBENS-PAVELLA, M. - "On-Line Measurements of Transient Stability Power System Index" - Computerized Operation of Power Systems, COPOS 75, São Carlos, Brasil, 1975
- 19 - COGO, J.R. "Determinação de Domínio de Estabilidade para Sistemas de Potência com n-máquinas" - Dissertação de M.Sc UFSC, Junho de 1977.

- 20 - BRAMELLER, A. and ALLAN, R.M. and AHMAM, Y.M. - "Sparsity" Pitman Publishing - 1976

- 21 - BERGEN, A.R. and HILL, D.J. - "Strutuse Preserving Model for Power System Stability Analysis" - IEEE Trans. on P.A.S., vol. PAS-100, n^o 1, Jan 1981 pp 25 a 42.

ANEXO A

DESCRIÇÃO DAS SUBROTINAS

A1. QUADRO 1: Subrotina DADS

Neste quadro, paralelo a leitura dos dados de barra, são formados os vetores de injeções de potência, identificação das barras e de estabelecimento de tensões unitárias.

Fluxograma:

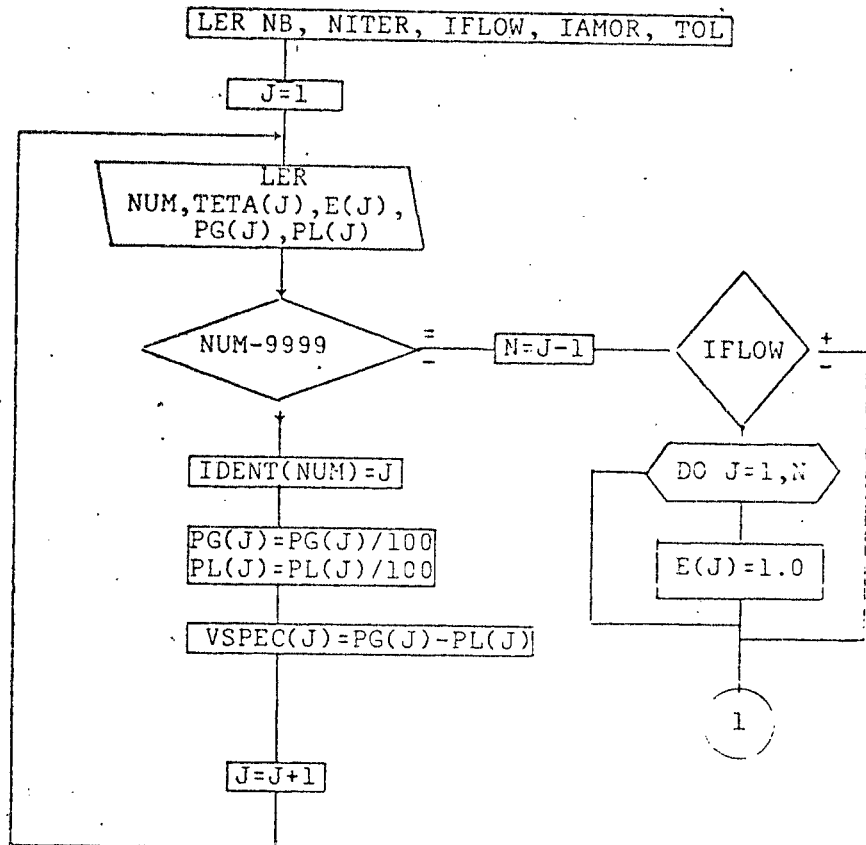


Fig 1 - Fluxograma da Subrotina DADS

Obs. Os dados são lidos na forma padronizada com os valores relativos a potência em per cent. O cartão "flag" é o que possui o valor 9999 no campo relativo ao número da barra.

Variáveis:

- TETA - Vetor dos ângulos (deve ser introduzido quando IFLOW=1)
- NUM - Número da barra no sistema real.
- PG - Vetor de gerações de potência
- PL - Vetor de injeções de potência

- VSPEC - vetor de injeções de potência
 E - vetor de tensões (também, quando IFLOW = -1)
 IDENT - vetor de identificação das barras
 NB - número da barra slack
 IFLOW - se 0 (zero) deve ser feito load-flow AC
 se 1 (um) deve ser feito load-flow DC
 se 1 (um) os dados de ângulos e tensão são
 lidos de cartões

A seguir são introduzidos os dados dos geradores: número da barra a que a máquina esta ligada, reatância transitória $X'd$ e constante de inércia H. São formados os vetores de identificação dos geradores e das admitâncias correspondentes às reatâncias transitória. Também é formado o vetor que determina uma constante para cada máquina que será usado durante a integração numérica; este vetor é função da constante de inércia.

Variáveis:

- NUM - número da barra a que está ligado o gerador
 XD - vetor das reatâncias transitórias
 M - vetor das constantes de inércia e posteriormente vetor das constantes de integração.
 IDENT - vetor de identificação das barras
 NBG - vetor de identificação dos geradores
 XT - vetor das admitâncias correspondentes às reatâncias transitórias

Observação:

-- a constante de integração é obtida por:

$$K = \frac{\pi \cdot f}{H}; \text{ onde } f \text{ é frequência e vale } 60 \text{ Hz}$$

- NITER - número de iterações para load-flow
 IAMOR - se 0 (zero) é usado o modelo de máquina com amortecimento
 se 1 (um) é usado o modelo de máquina sem amortecimento
 DP - vetor das constantes de amortecimento das máquinas
 TOL - tolerância para os desvios de potência no load-flow.

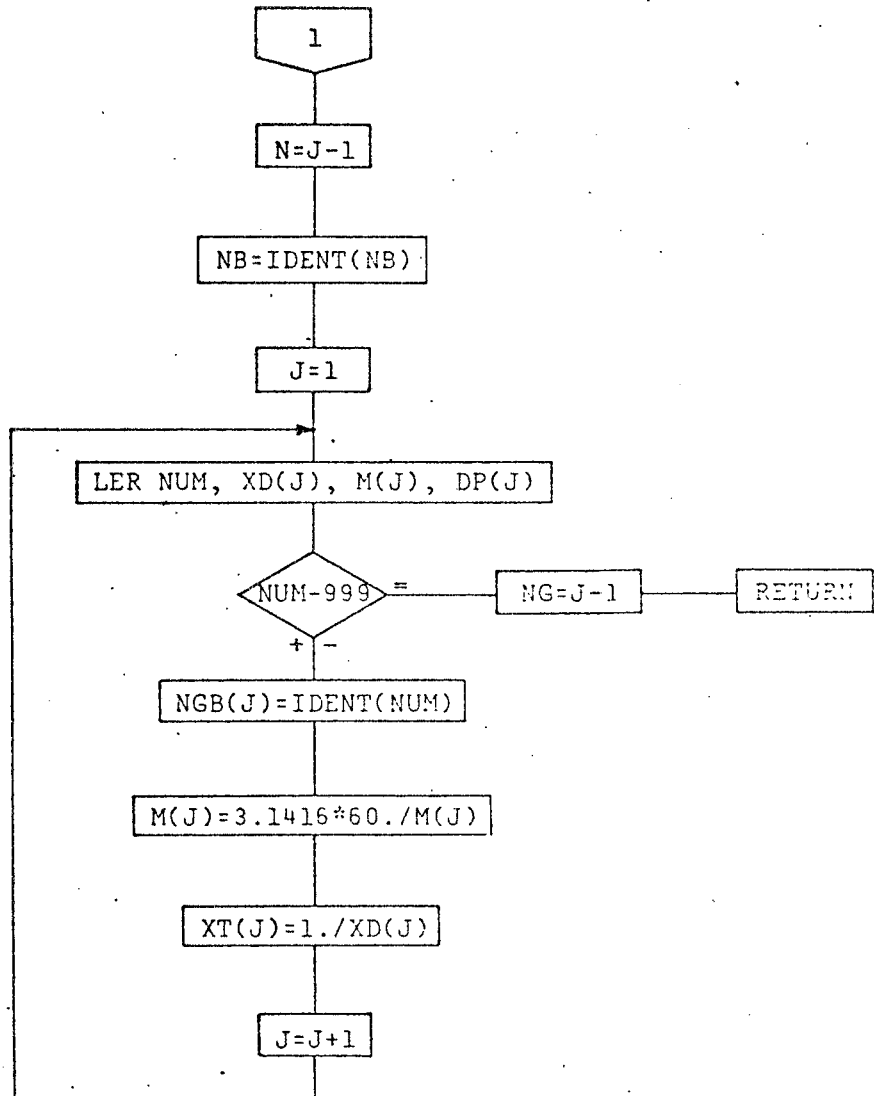


Fig. 2 - Continuação do Fluxograma da Subrotina DADS

A2. QUADRO 2:

Neste quadro a matriz YBUS do sistema é armazenada em forma de um vetor compacto, onde só os valores diferentes de zero são guardados.

Variáveis:

- CE - vetor que armazena os valores não-nulos de YBUS.
- ITAG - vetor paralelo a CE, indica a linha que pertence o elemento CE correspondente.
- LNXT - vetor paralelo a CE, indica o endereço em CE do próximo elemento de sua coluna. Se igual a zero indica o fim da coluna.
- LCOL - vetor que indica o endereço em CE do primeiro elemento de cada coluna.
- NOZE - vetor que dá o número de elementos de cada coluna.
- NIAG - vetor que indica o endereço em CE dos elementos da diagonal
- N - número de barras do sistema menos um.
- NB - número da barra de folga.
- M(1), M(2) - números das barras que identificam a linha no sistema real.
- ZSER - impedância série da linha
- YSH - admitância shunt total da linha
- LF - endereço em CE que indica a próxima posição disponível

Descrição do método:

A partir da leitura dos dados de linha o vetor CE é montado armazenando os valores em pilha; o vetor ITAG é formado paralelamente indicando a linha do elemento, o vetor LNXT é montado de maneira que faça a conexão entre os elementos de uma mesma coluna e que estes valores estejam ordenados. Simultaneamente, os vetores LCOL e NOZE vão sendo atualizados, de maneira que no fim do processamento contenham as informações de endereço de início e quantidade de elementos de cada coluna, respectivamente.

Observações:

- Os dados de linha são lidos na forma padronizada.
- Flág dos dados: valor -1 no campo numérico referente a M(1).
- A barra flag é posicionada nas últimas posições dos vetores.

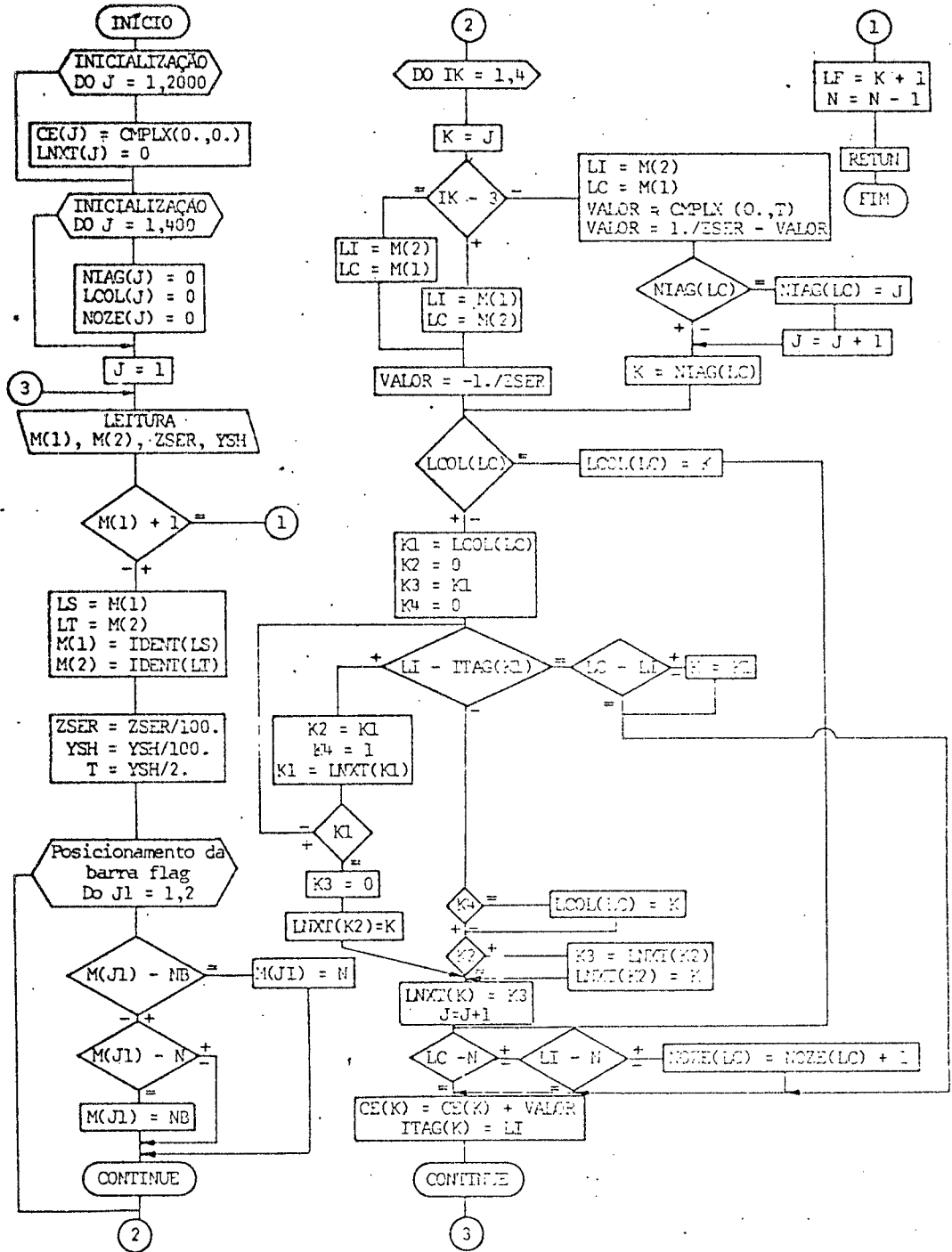


Fig. 3 - Fluxograma da Subrotina FORMA

A3. QUADRO 3 e 4: Subrotina DATLF E LFLOW

A resolução do load-flow é feita através de duas rotinas que são:

- DATLF: rotina que prepara os dados para o "flow".
- LFLOW: rotina de solução.

Descrição das rotinas:

DATLF:

Nesta rotina a partir dos vetores montados na subrotina FORMA são formados os vetores a serem usados na rotina LFLOW.

Variáveis:

- LCOL, ICOL - idem a descrição para a subrotina FORMA.
- NOZE, MOZE - idem
- CE, Y - idem
- ITAG, NTAG - idem
- LNXT, INXT - idem
- N - idem

Descrição:

A matriz jacobiana em forma de vetor (CE) é formada, coluna por coluna, sendo considerado apenas a parte imaginária dos dados de admitância, uma vez que a matriz é calculada na origem.

Os dados referente a barra de folga são retirados do vetor, já que a ordem da matriz é $n-1$. Os vetores resultantes são: LCOL, NOZE, CE, ITAG, LNXT.

LFLOW:

Esta rotina resolve o problema do fluxo de carga para uma dada configuração do sistema, obtendo os ângulos de operação de suas barras.

Ela explora a esparsidade da matriz jacobiana, armazenando as suas informações em forma de vetor conforme mostrado nas subrotinas DATLF e FORMA. O método usado considera um desacoplamento entre potência ativa-ângulo e potência reativa-módulo da tensão e, como o objetivo do flow é encontrar os ângulos de operação das barras, o sistema de equações a ser resolvido é:

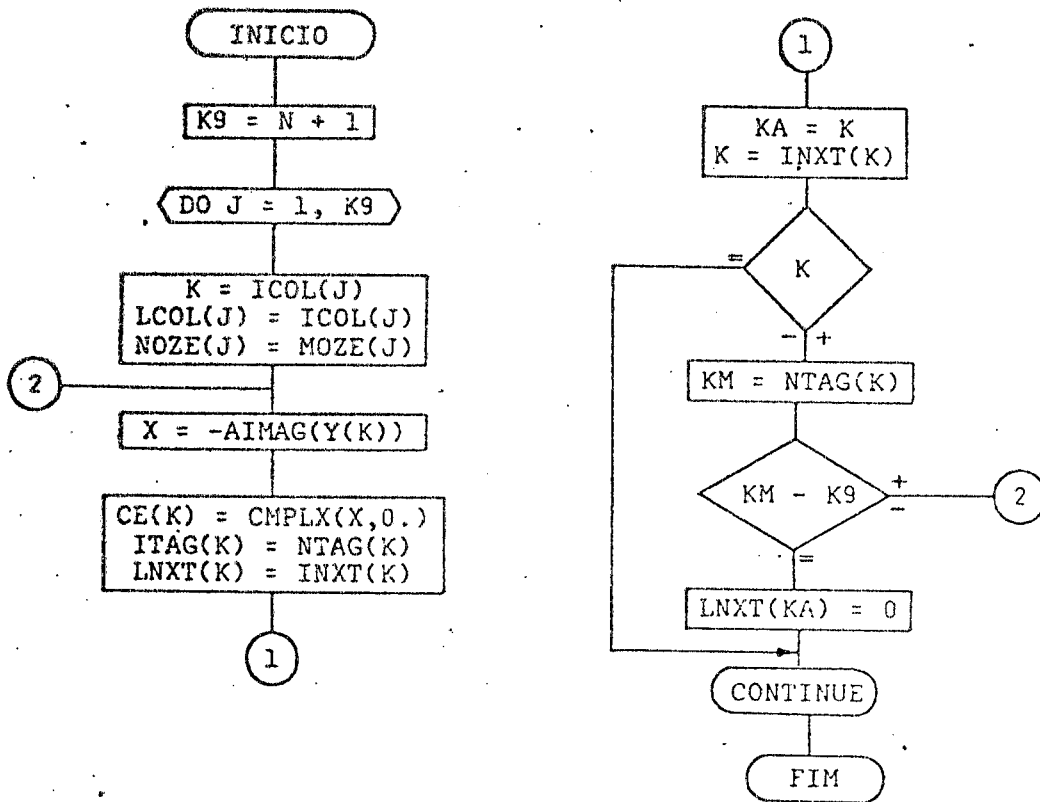


Fig. 4-Fluxograma da subrotina DATLF

$\Delta P = J(\theta) \Delta\theta$, onde:

ΔP = Potência especificada - potência calculada

$J(\theta)$ = Matriz jacobiana calculada na origem e mantida constante durante o processo iterativo.

$\Delta\theta$ - desvios de ângulos

O sistema acima é resolvido num processo iterativo de reajustes dos ângulos até que o desvio de potência ($\Delta\theta$) alcance uma tolerância especificada. Então, numa iteração K deve ser resolvido:

$$\Delta\theta = J^{-1} \Delta P \text{ e corrigir os ângulos através de } \theta^K = \theta^{K-1} + \Delta\theta.$$

A inversa do Jacobiano é resolvida usando a bi-fatorização, processo no qual a inversa de uma matriz é obtida implicitamente pelo produto de n matrizes fatores. O problema de enchimento da matriz ocasionado pela bi-fatorização é amenizado por uma ordenação de pivotamento obtida numa simulação da bi-fatorização, evitando, desta forma, a perda da esparsidade da matriz, fato que se acontecesse tornaria nulo o uso das técnicas de armazenamento com vetores.

Rotinas auxiliares:

ORDEM - Esta rotina faz a simulação da fatorização, já formando nos vetores a imagem da matriz reduzida, ou seja, gera as posições novas que vão aparecer com o enchimento e elimina as posições que serão zeradas. Sua principal função, no entanto, é estabelecer a sequência de pivotamento.

Variáveis:

CE - idem a descrição da rotina FORMA
 ITAG - idem
 LNXT - idem
 LCOL - idem
 NOZE - idem
 NSEQ - vetor que dá a sequência de pivotamento.
 N - idem.
 LF - idem

Descrição:

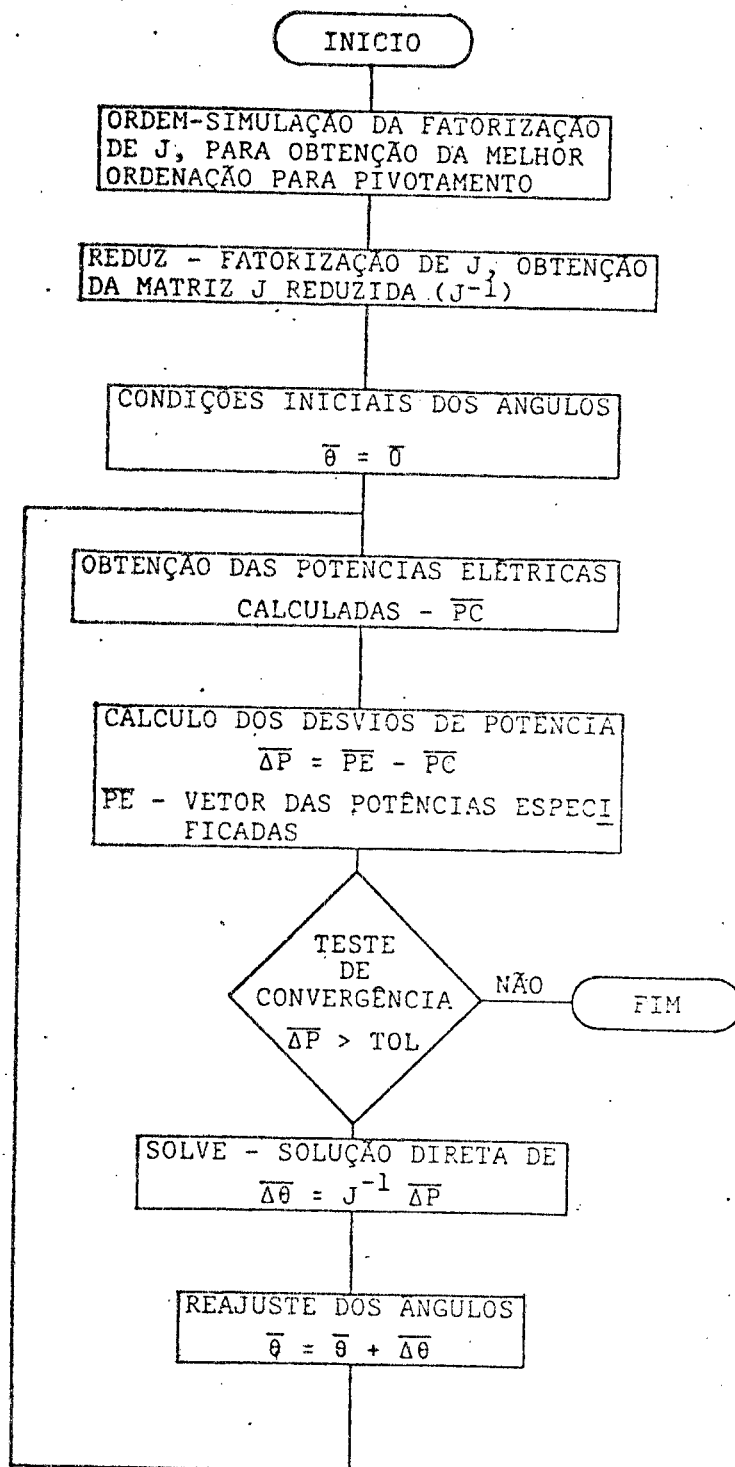


Fig. 5

Descrição da rotina LFLOW:

A cada passo da simulação é escolhida para ser pivota da a coluna que tiver o menos número de elementos; este é um critério de selecionamento para evitar um enchimento muito grande. Após escolhida a coluna a ser pivotada, todas as colunas que tenham elementos em comum com a pivotada são comparadas sequencialmente, elemento a elemento, com a mesma. Desta maneira são zeradas e geradas as posições conforme a posição relativa dos elementos das colunas. Portanto, após todas as colunas terem sido pivotadas, os vetores de informação LNXT, LCOL, ITAG, NOZE e NSEQ estão atualizados e contendo as informações que definem a configuração da matriz reduzida a ser obtida na rotina REDUZ.

REDUZ:

Esta rotina calcula a matriz reduzida, ou seja, obtém implicitamente a inversa da matriz na forma de n matrizes fatores, as quais por sua forma podem ser armazenadas nos vetores que definiam a matriz da qual se deseja a inversa.

Descrição do método:

No processo de bi-fatorização a inversa de uma matriz é obtida implicitamente como o produto de n matrizes fatores, então

$$A^{-1} = R^{(1)} R^{(2)} \dots R^{(n-1)} R^{(n)} L^{(n)} L^{(n-1)} \dots L^{(2)} L^{(1)}$$

onde $L^{(i)}$ e $R^{(i)}$ são matrizes fatores muito esparsas, diferenciando-se da matriz unidade apenas na constituição da coluna i e linha i , respectivamente.

No caso da matriz ser simétrica os termos de $R^{(i)}$ e $L^{(i)}$ guardam a seguinte relação:

$$r_{jk}^{(j)} = l_{ij}^{(j)} \quad \text{para } i = k \neq j$$

Este fato, somado ao fato da matriz fator R^i ter a diagonal unitária mesmo na linha i , possibilita o armazenamento da matriz reduzida em cima da matriz dos coeficientes.

Para a determinação das matrizes vetores são definidas as matrizes intermediárias,

$$\begin{aligned} A^{(0)} &= A \\ A^{(1)} &= L^{(1)} A^{(0)} R^{(1)} \\ A^{(2)} &= L^{(2)} A^{(1)} R^{(2)} \\ &\text{-----} \end{aligned}$$

tado é armazenado no próprio vetor $\overline{\Delta P}$.

Variáveis:

VSPEC - vetor de injeções de potência.

V - vetor que representa os vetores $\overline{\Delta P}$ e $\overline{\Delta \theta}$ em SOLVE e no resto do programa representa o vetor dos ângulos $\bar{\theta}$.

DIAG - vetor auxiliar para as trocas de identidade de V.

NITER - número máximo de iterações para o flow

TOL - tolerância desejada para os desvios de potência.

DVMAX - maior desvio de potência de uma iteração.

E - vetor das tensões de barra.

NC - contador de iterações.

N - número de barras do sistema menos um.

Y - vetor que representa a matriz YBUS, obtido na rotina DATLF.

CE, NTAG, INXT, LCOL - idem as descrições anteriores.

Observações:

- Como condição inicial é atribuído valor zero para os ângulos.

- Já que na formação da matriz YBUS foram trocadas de posição a barra swing e a última barra, o mesmo é feito para os dados de potência e de ângulo.

- A potência especificada de cada barra é calculado pela seguinte fórmula:

$$P_i = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j ((G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})),$$

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

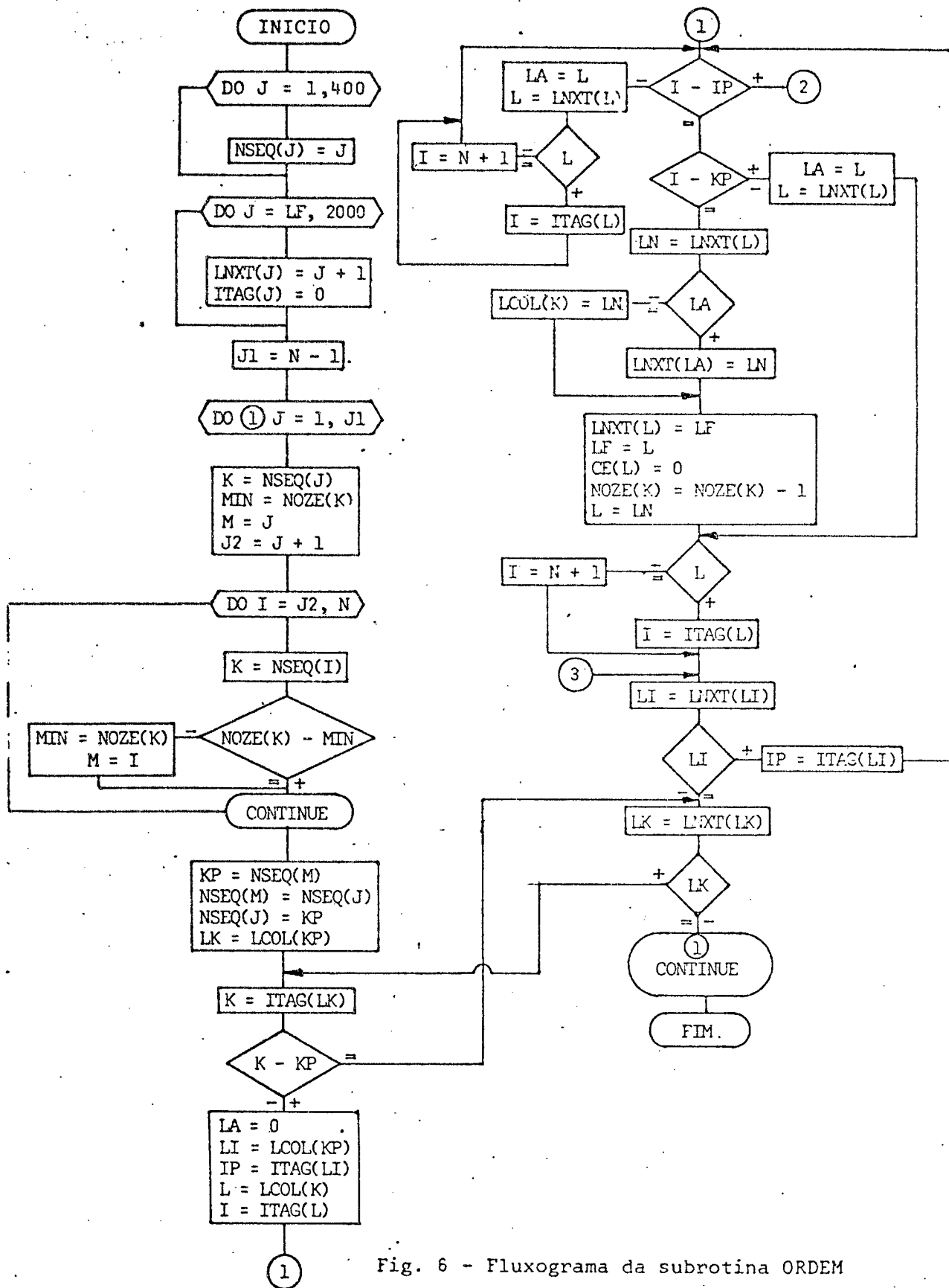


Fig. 6 - Fluxograma da subrotina ORDEM

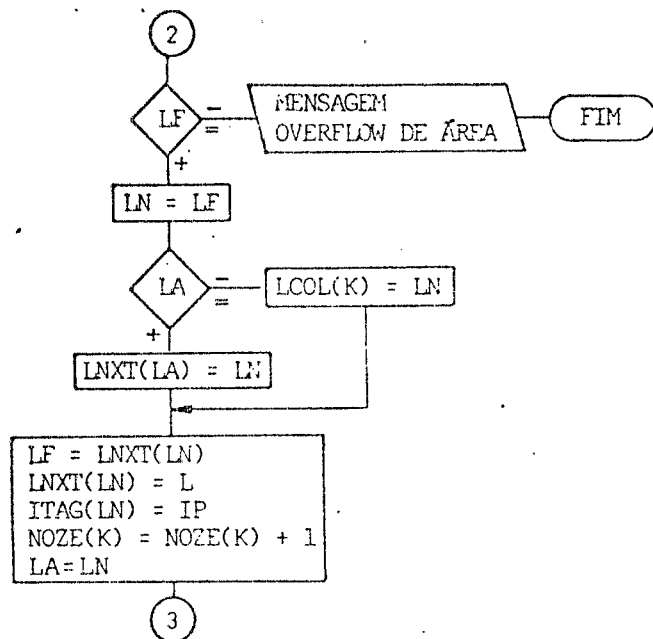


Fig. 7 - Continuação do Fluxograma da subrotina ORDEM

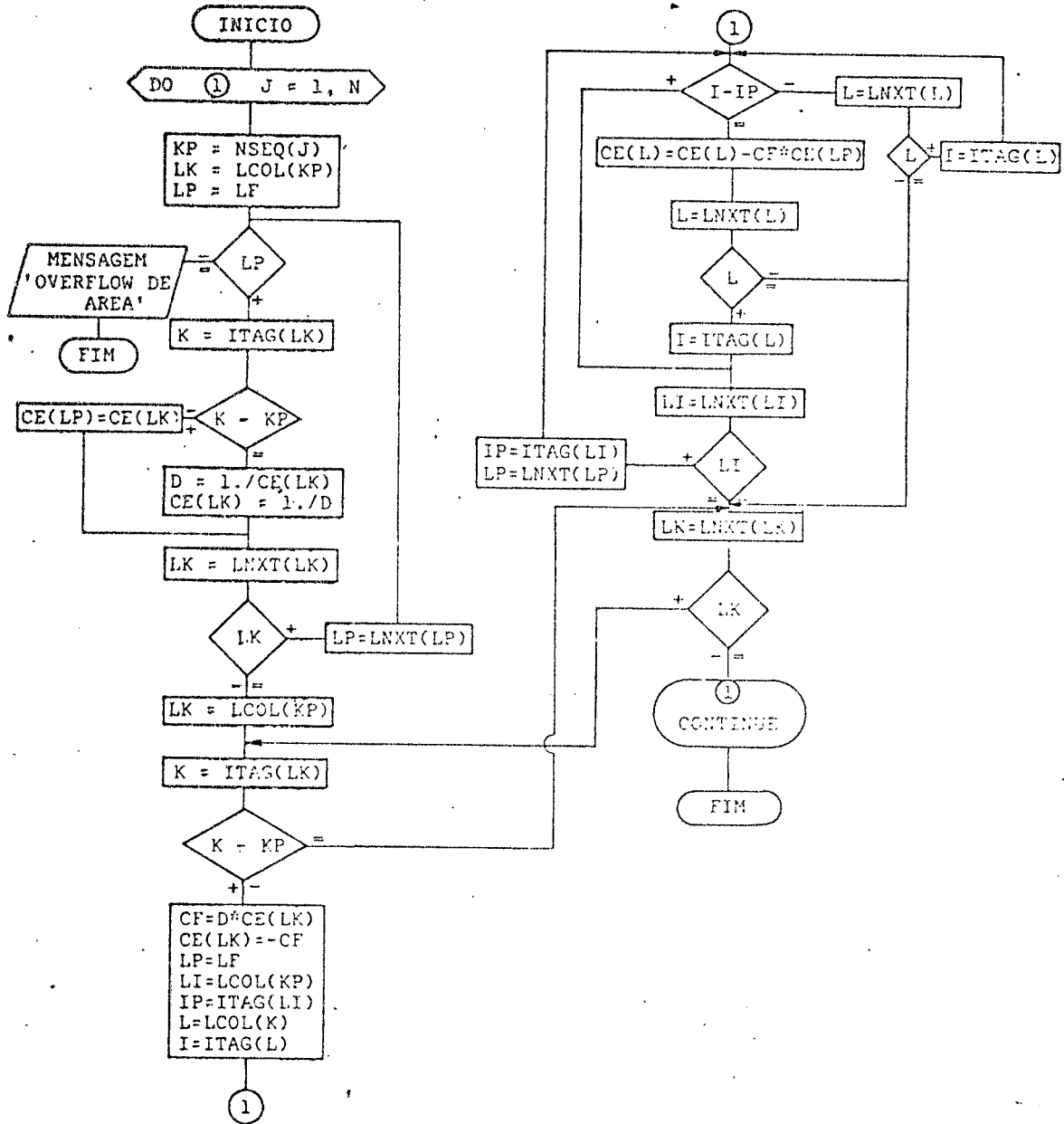


Fig. 8 - Fluxograma da rotina REDUZ

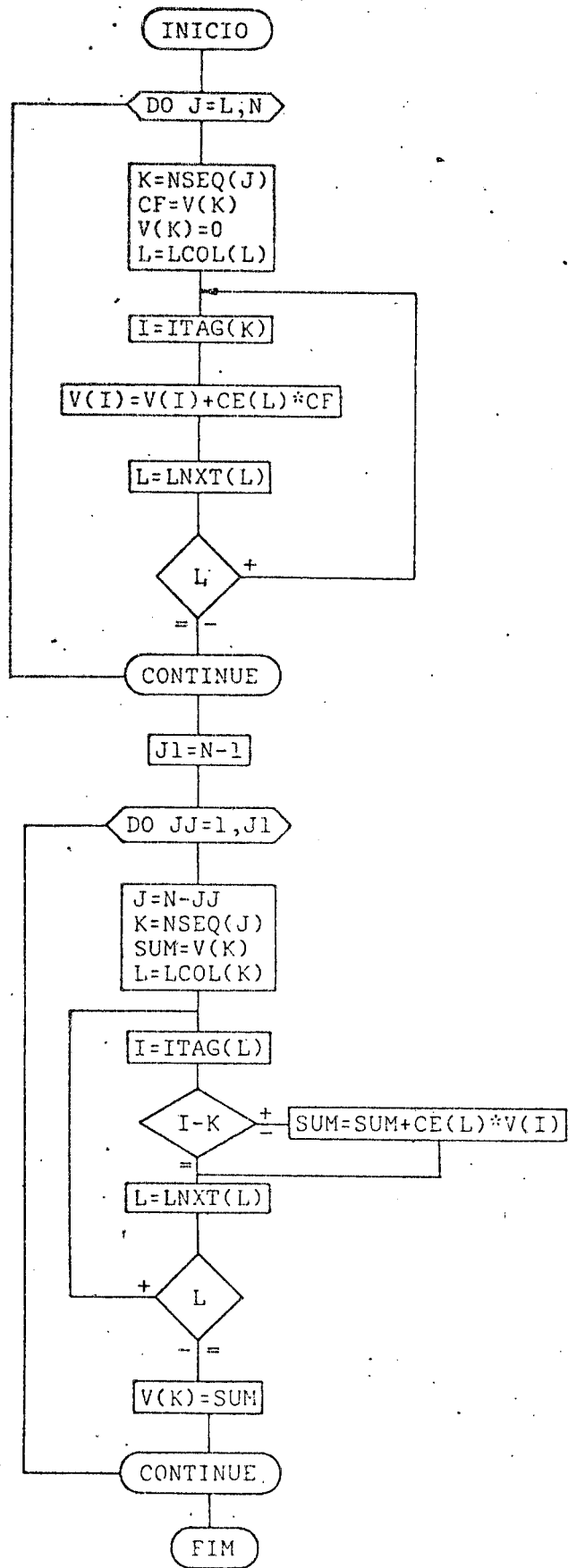


Fig. 9 - Fluxograma da subrotina SOLVE:

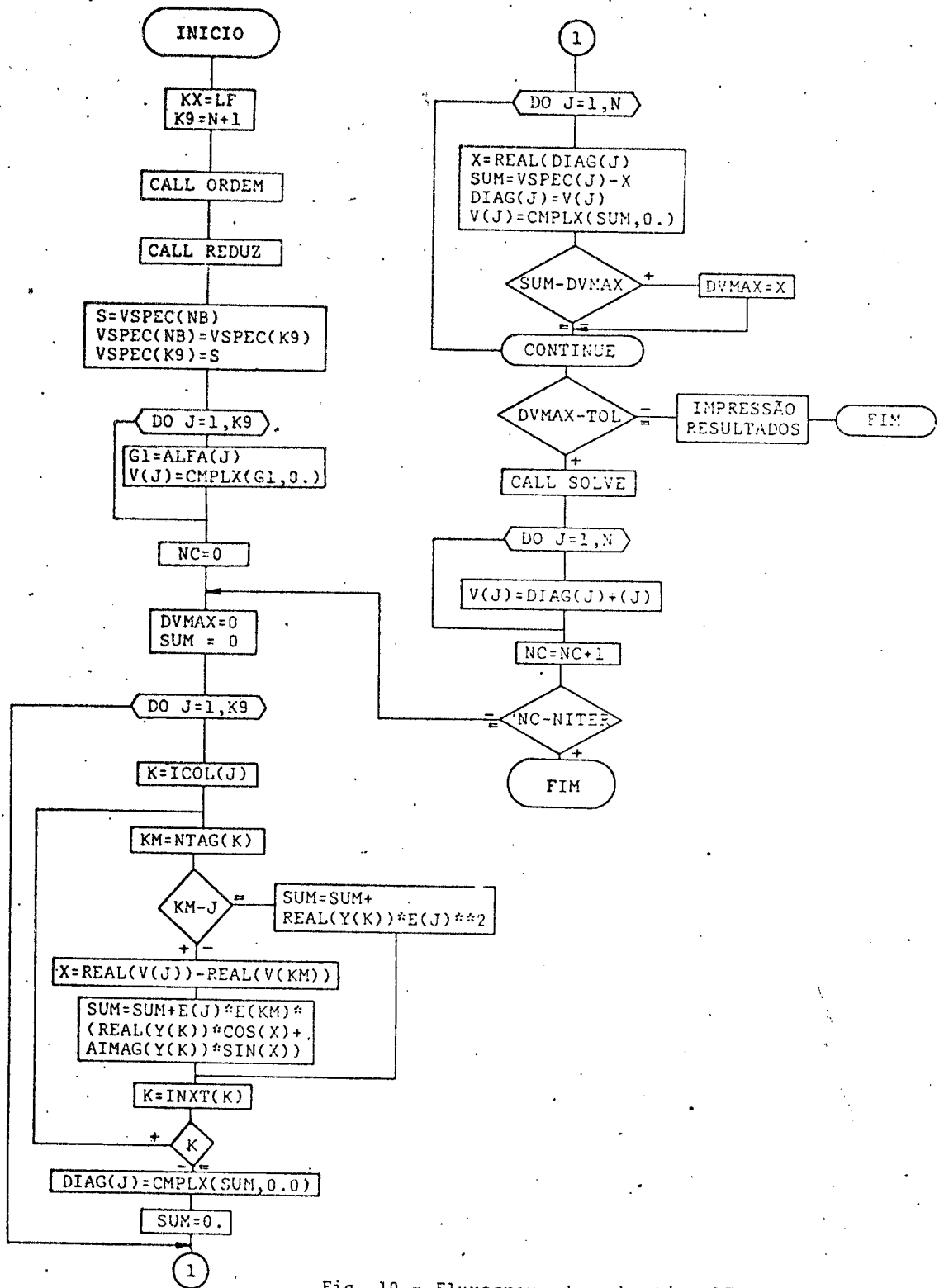


Fig. 10 - Fluxograma da subrotina LFLOW:

A4. QUADRO 5: Obtenção dos ângulos internos

São obtidos os ângulos internos das máquinas; esta informação é guardada num vetor para que possa ser utilizada na análise de outros casos, sendo portanto transposta para um vetor de trabalho que será manipulado no restante do processamento do caso em análise.

É definida também a potência mecânica das máquinas, sendo feita igual a potência elétrica do regime de operação normal do sistema. Para manter a identidade dos valores as informações da barras N e NB são permutadas.

Variáveis:

ALKA - vetor que determina e guarda os valores dos ângulos internos.

PM - vetor das potências mecânicas das máquinas.

ALFA - vetor dos ângulos de barra (load-flow)

Observação:

Os ângulos internos são calculados por:

$$\alpha = \theta + \text{tg}^{-1} (P.X'd), \text{ onde:}$$

θ - é o ângulo da barra a que está ligada a máquina, este valor é obtido no load-flow.

P - é a potência elétrica da barra

X'd - é a reatância transitória da linha

A5. QUADRO 6: Seleção do tipo de contingência

Nesta etapa deve ser especificado a análise que se de seja fazer, existem dois tipos de contingências que o programa aceita:

- curto-circuito numa barra com subsequente retirada de linha e,
- apenas retirada de linha.

Dentro destes dois casos o programa aceita diversas variantes, podendo fazer um processamento em cascata, de modo que resultados obtidos num caso possam ser utilizados em outro, diminuindo assim o tempo de processamento.

A descrição destas situações será feita no 'MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA', e o fluxograma não será descrito porque conforme a situação o processamento segue caminhos diferentes no programa; isto será abordado em detalhes no manual já referido.

A6. QUADRO 7: Subrotina SCC

Aqui é feita a descrição da rotina SCC, que tem por função simular o efeito do curto-circuito na estrutura do sistema, ou seja aterrar a barra em falta. Isto é feito eliminando-se a barra da matriz YBUS; no nosso caso deve-se eliminá-la dos vetores que armazenam a matriz.

Descrição:

Como no caso da matriz YBUS que para retirar uma barra deve-se compactá-la após para evitar a singularidade da matriz, o mesmo deve ser feito para o armazenamento em vetores. Para tanto o procedimento usado foi o de trocar as posições da barra de falta e a última, considerando-se a seguir o sistema com n-1 barras. Como na rotina DALTLF foram gerados vetores de trabalho a partir dos vetores padrões obtidos na rotina FORMA. Nesta rotina é representado também o efeito das cargas que são representadas por impedância constante. As posições de memória correspondente a barra de falta foram liberadas e apesar de estarem misturadas as outras serão as primeiras a serem ocupadas durante o enchimento da matriz, na sua inversão quando da execução da redução às barras internas.

Variáveis:

CE, Y, INXT, LNXT, LCOL, ICOL, NTAG, ITAG, NOZE, MOZE - vetores definidos na rotina FORMA.

KM - número da barra de falta

N - número total de barras do sistema

LF - primeira posição disponível em memória do vetor CE

VSPEC - vetor das cargas do sistema

NIAG - vetor que dá o endereço das diagonais da matriz YBUS, para o vetor CE.

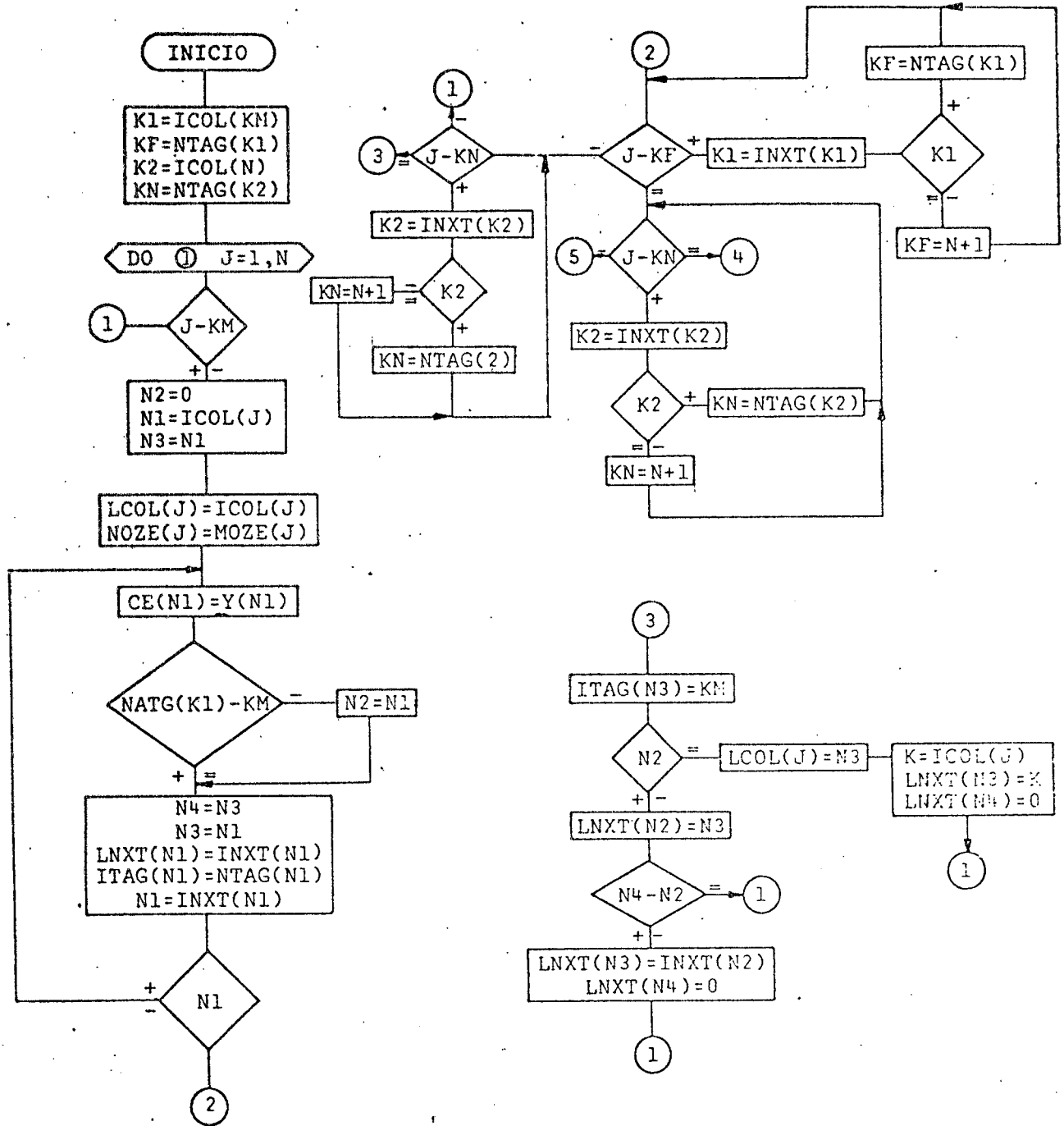


Fig. 12 Fluxograma da rotina SCC:

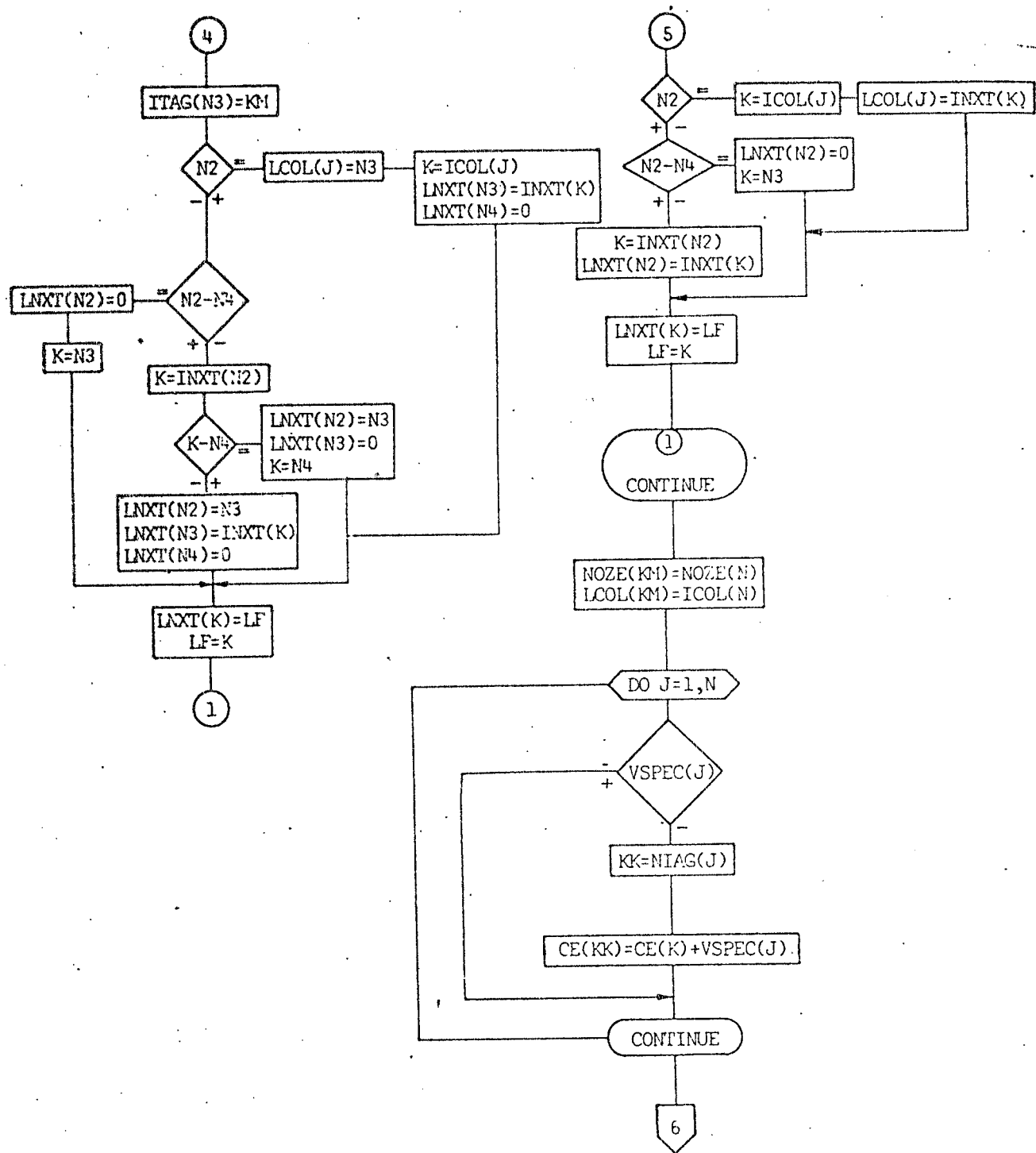


Fig. 13 - Continuação do fluxograma SCC:

Aqui trata-se da representação do gerador no estudo da contingência; assume-se que as máquinas são representadas por uma fonte de tensão atrás de uma reatância transitória $X'd$. Portanto a estrutura do sistema, ou mais precisamente a matriz YBUS, deve ser alterada pois a reatância transitória deve ser levada em conta. Neste quadro são alterados somente os elementos da diagonal da matriz, já que as outras posições que vão surgir com a matriz aumentada para fazer a redução às barras internas, ficam implicitamente determinados pelo vetor de identificação das barras de geração.

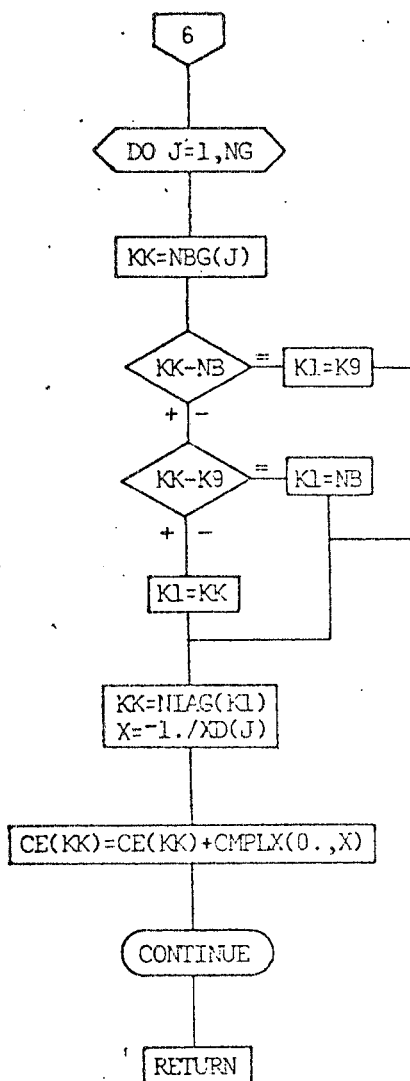


Fig. 14 - Continuação do fluxograma da Subrotina SCC:

A7. QUADRO 8: Subrotina RBI

Neste quadro descreve-se a rotina RBI, encarregada de fazer a redução do sistema às suas barras internas. O processo é baseado na redução de Kron, onde assumindo que as cargas são impedâncias constante, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gr} \\ Y_{rg} & Y_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_r \end{bmatrix}$$

onde os subscritos significam:

g - nós das barras internas, com injeção de potência

r - nós das outras barras, sem injeções de potência.

Da equação acima, vem:

$$I_g = (Y_{gg} - Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg}) V_g, \text{ de onde tira-se a matriz}$$

reduzida

$$Y_{red} = Y_{gg} - Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg}$$

A matriz Y_{rr} em forma de vetor foi construída na subrotina SCC, onde a representação das cargas na matriz foi feita e no quadro 9, onde o efeito das reatâncias transitórias dos geradores foi considerada. As matrizes Y_{gg} , Y_{gr} e Y_{rg} não são construídas explicitamente, pois os valores e posições de seus elementos são obtidos pelos vetores XD e NBG, respectivamente.

A solução da equação matricial é obtida decompondo as matrizes Y_{gr} , Y_{rg} e Y_{gg} em vetores colunas, desta maneira obtendo-se a matriz inversa de Y_{rr} pela rotina REDUZ; operando essa matriz com os vetores colunas, obtém-se, coluna por coluna na forma matricial, a matriz YBUS reduzida às suas barras internas.

Para a obtenção da coluna i da matriz Y reduzida são necessários os seguintes passos:

1) multiplicação da matriz Y_{rr}^{-1} pelo vetor-coluna i de Y_{rg} (b_i)

$$Y_{rr}^{-1} \cdot b_i = b'_i \text{ (rotina SOLVE)}$$

2) multiplicação da matriz Y_{gr} pelo vetor b'_i .

$$Y_{gr} \cdot b'_i = b''_i \quad (\text{multiplicação matricial})$$

3) subtração da coluna-vetor \underline{i} de Y_{gg} por b''_i

$$Y_{red}^i = Y_i - b''_i \quad (\text{diferença de vetores})$$

onde

Y_{red}^i é a coluna i da matriz reduzida

Y_i é a coluna i da matriz Y_{gg}

Este processo deve ser repetido para as NG (número de geradores) colunas da matriz Y reduzida.

Variáveis:

- N - número de barras do sistema.
- KM - número da barra onde ocorreu o curto-circuito se a contingência for curto-circuito; se for retirada de linha este valor deve ser ZERO.
- CE, ITAG, LNXT, NOZE, NSEQ, LCOL - idem a descrição anterior.
- B - vetor auxiliar na montagem dos vetores colunas.
- NB - Vetor que no quadro 4 recebeu o nome de NBG, ele identifica as barras aonde os geradores estão conectados, desta maneira torna possível a formação implícita das matrizes Y_{rg} , V_{gr} e V_{gg} .
- XD - Vetor das admitâncias correspondentes às reatâncias transitórias dos geradores, XT no quadro 4.
- Y - matriz admitância do sistema reduzido às suas barras internas. A ordem da matriz é $HG \times NG$.
- BG - número de geradores
- NS - número da barra de folga
- LF - primeira posição disponível em memória para armazenamento de valores do vetor CE.

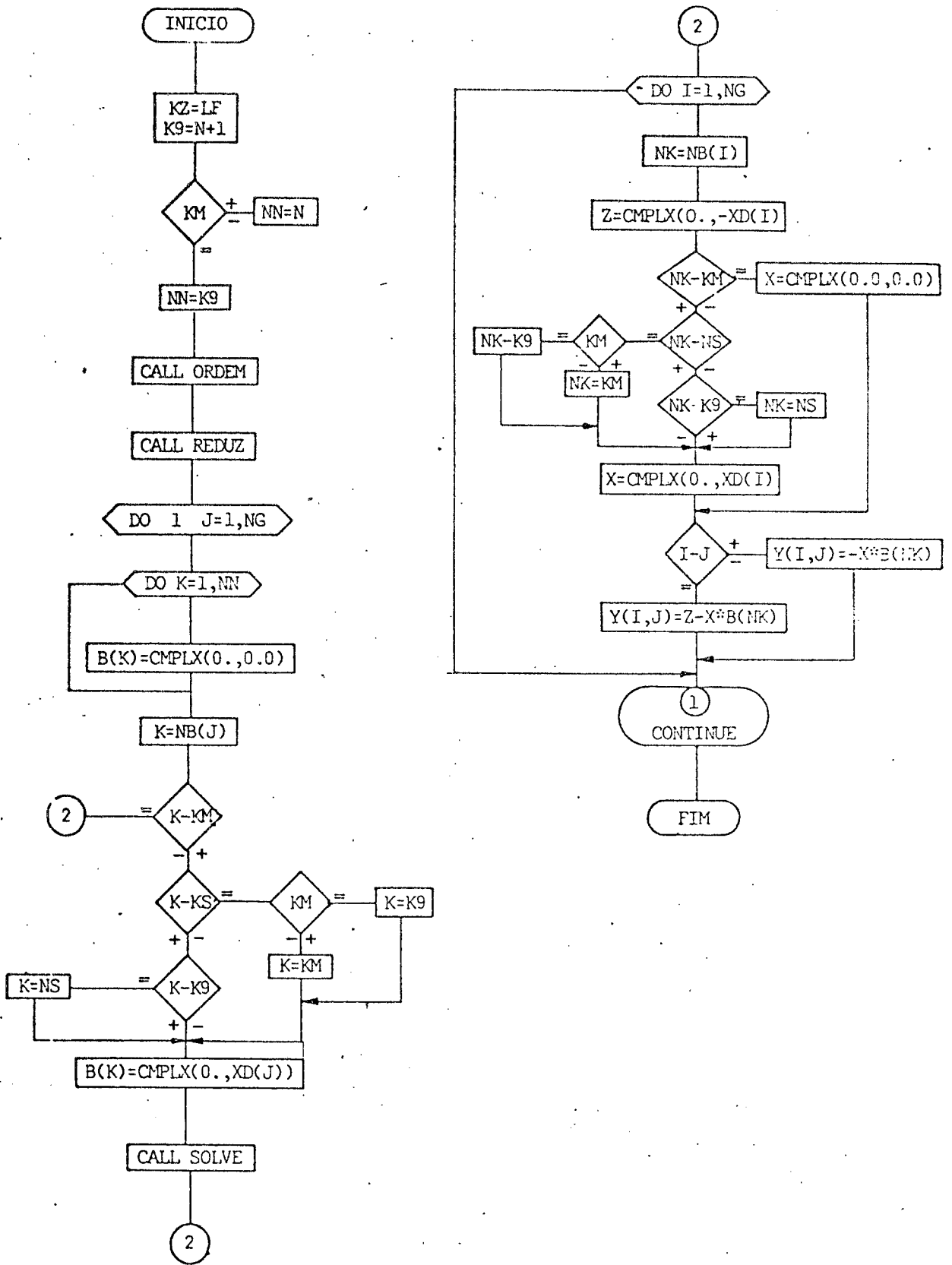


Fig. 15 - Fluxograma da subrotina RBI:

A8. QUADRO 9: Subrotina INTG

As equações diferenciais que descrevem o comportamento dos geradores durante a falta são resolvidas usando o método de Euler modificado. Neste método é calculada inicialmente uma primeira inclinação; Em seguida é calculada uma segunda inclinação com os resultados obtidos anteriormente e, finalmente é usada como inclinação para o passo de integração escolhido a média aritmética entre as duas inclinações já calculadas.

Fórmulas usadas:

equações diferenciais dos geradores:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega - 2\pi f$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M} (P_m - P_e - D \cdot \omega)$$

P_e - potência elétrica dos geradores, calculada por:

$$P_{e(i)} = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

P_m - potência mecânica dos geradores, valor que permanece constante durante a integração.

ω - velocidade dos geradores.

θ - ângulo interno das máquinas.

D - coeficiente de amortecimento.

São usadas duas rotinas auxiliares, POT e DERIV, além da rotina principal INTG, a primeira calcula as potências elétricas dos geradores a cada passo de integração e a segunda calcula as derivadas (inclinações).

Variáveis:

- ALFA, TETA - vetores de ângulos
- W, WN - vetores de velocidades
- PE - vetor das potências elétricas
- PM - vetor das potências mecânicas
- DALFA, DTETA - vetores das derivadas de ângulos
- E - vetor das tensões
- IAMOR - zero - modelo com amortecimento
um - modelo sem amortecimento
- DW, DWN - vetores das derivadas de velocidade
- Y - matriz de admitância do sistema reduzido

às barras internas

H	- passo de integração
TMAX	- tempo de integração
N	- número de geradores
M	- vetor de constantes de integração (1/M) dos geradores.
DP	- vetor dos coeficientes de amortecimento.

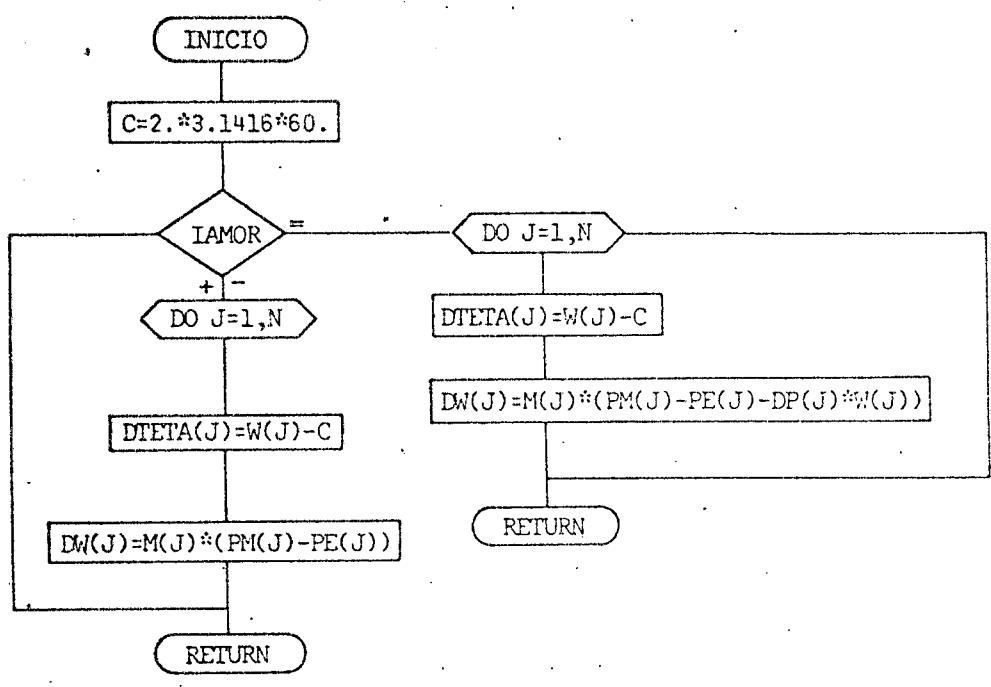


Fig. 16 - Subrotina DERIV:

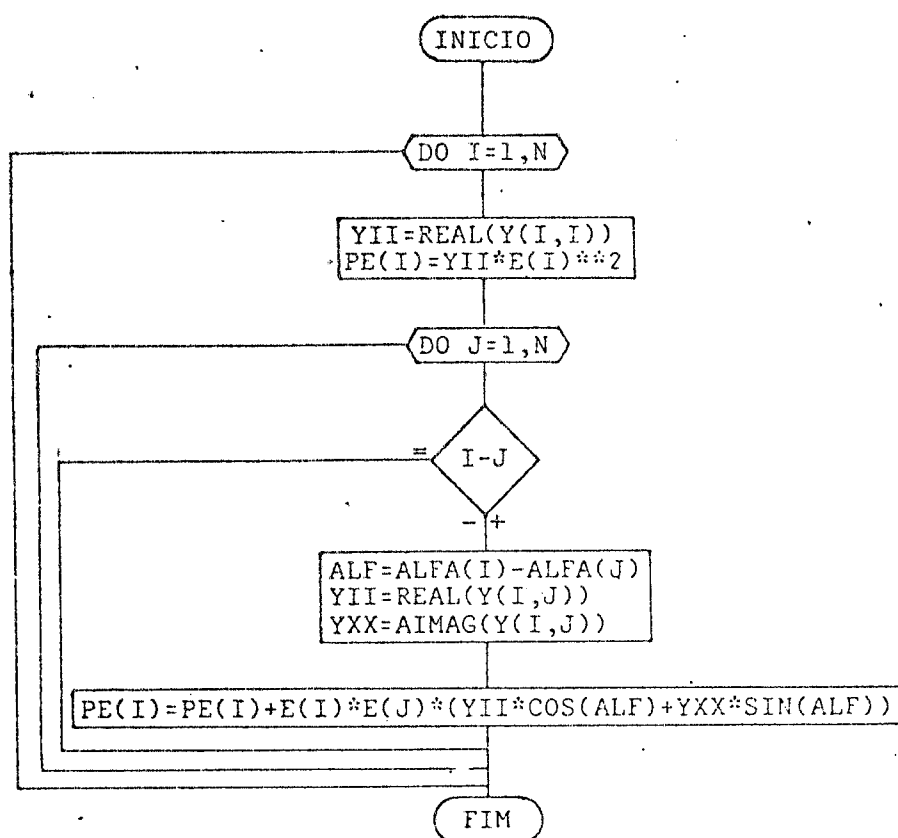


Fig. 17 - Subrotina POT

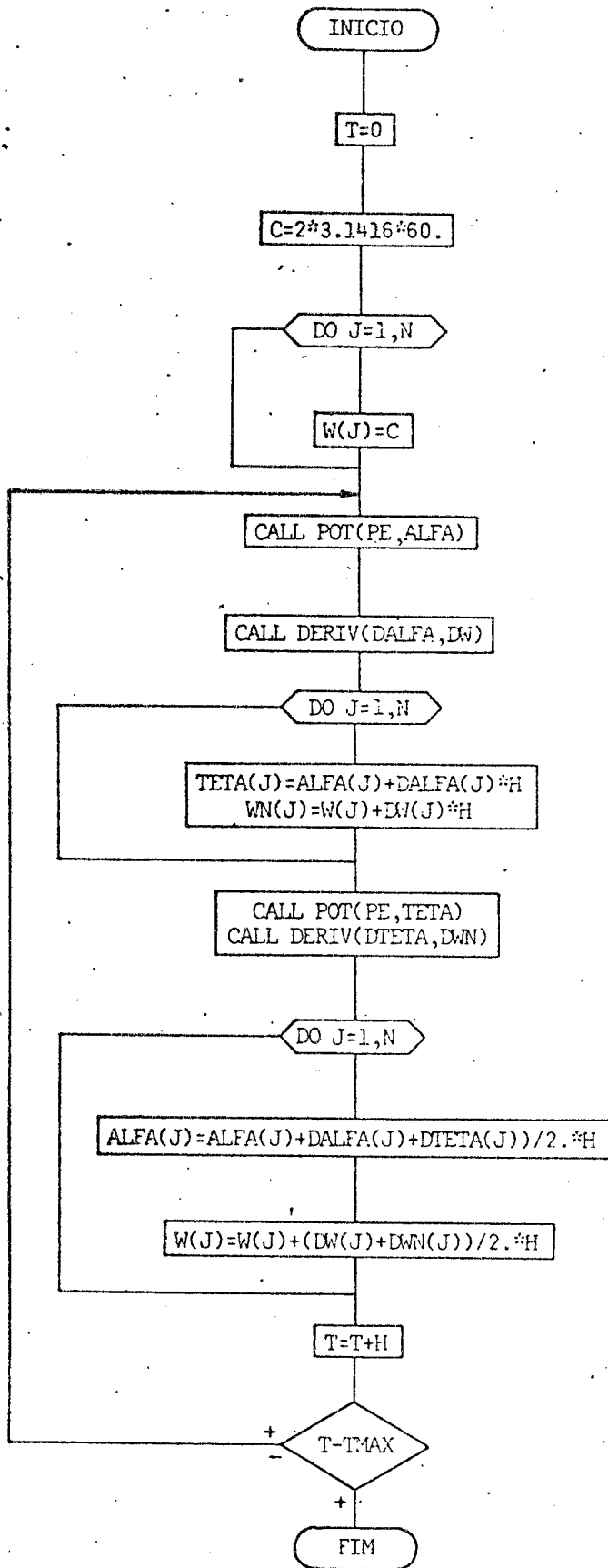


Fig. 18 Subrotina INTG:

A9. QUADRO 10: Subrotina RLIN

Nesta rotina é feita a simulação da retirada de uma linha, isto é feito alterando-se os vetores que contêm as informações de linha com a eliminação dos dados referentes a linha. Esta modificação é feita nos vetores padrões, e devido a isso é construído um vetor auxiliar que guarda as informações de posição dos dados alterados, possibilitando a reconstituição dos vetores padrões.

Variáveis:

- KM, KS - número das barras da linha que deve ser retirada
- YG - admitância da linha = $-1/Z$ série
- IAP - vetor que guarda as posições a serem alteradas

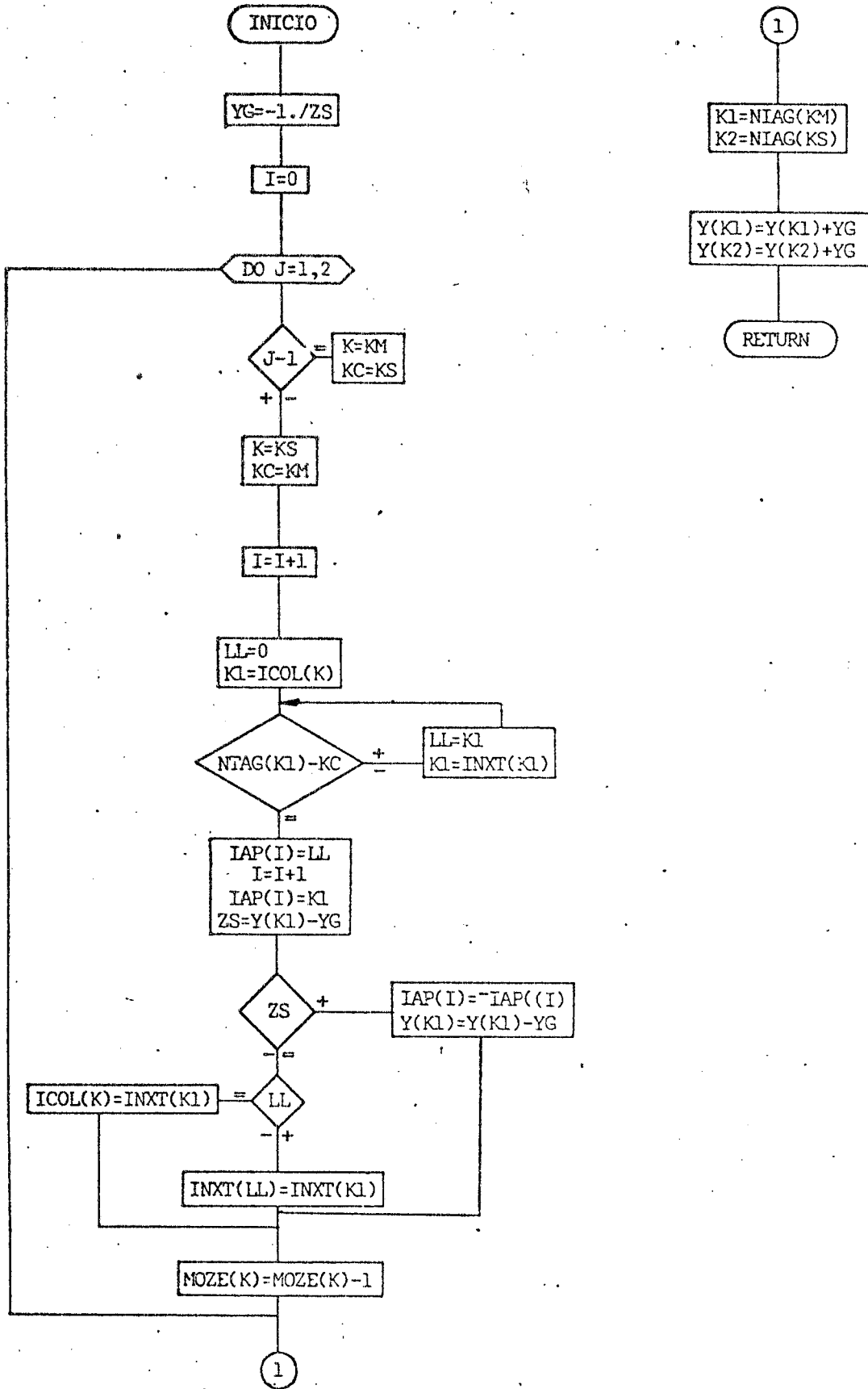


Fig. 19 - Fluxograma da Sub Rotina RLIN

A10. QUADROS 11 e 12: Ângulos internos pós-defeito

Neste instante deve ser feito um load-flow para o sistema pós-falta visando encontrar o ponto de operação para o sistema sob estas condições. A estrutura do sistema descrita pelos vetores padrões foi alterada no quadro 10 e através da rotina DATLF, já descrita, são formados os vetores de trabalho para serem usadas na rotina LFLOW, a seguir. Após são obtidos os ângulos internos dos geradores, referenciados ao ângulo da n-ésima máquina.

Variáveis:

BETA - ângulos das barras obtidas no load-flow (vetor).

TETA - ângulos internos dos geradores (vetor).

NBG - vetor de identificação das barras de geração

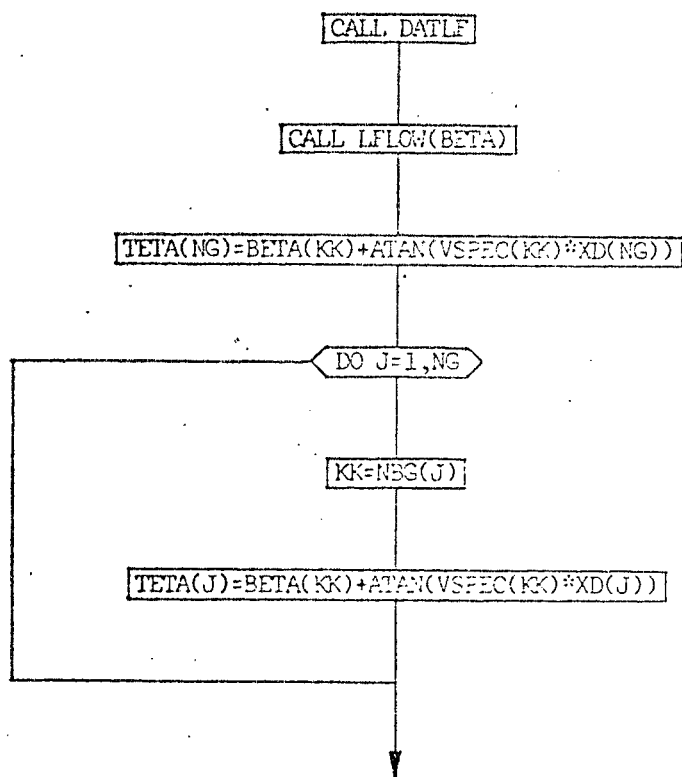
VSPEC - vetor de injeções de potência

NG - número de geradores

XD - vetor das reatâncias transitórias dos geradores.

Observação:

- As condições iniciais para o load-flow são os ângulos do sistema antes da falta.



QUADRO 13

Fig. 20 - Descrição dos quadros 11 e 12

All. QUADRO 13: Subrotina TCC

Aqui é descrita a subrotina TCC que prepara vetores de trabalho para serem usados na redução às barras internas de sistema pós-falta. São incluídos os equivalentes de carga e de geradores. Como nas rotinas DATLF e SCC, os vetores são construídos a partir dos vetores padrões, neste caso os vetores alterados no quadro 12.

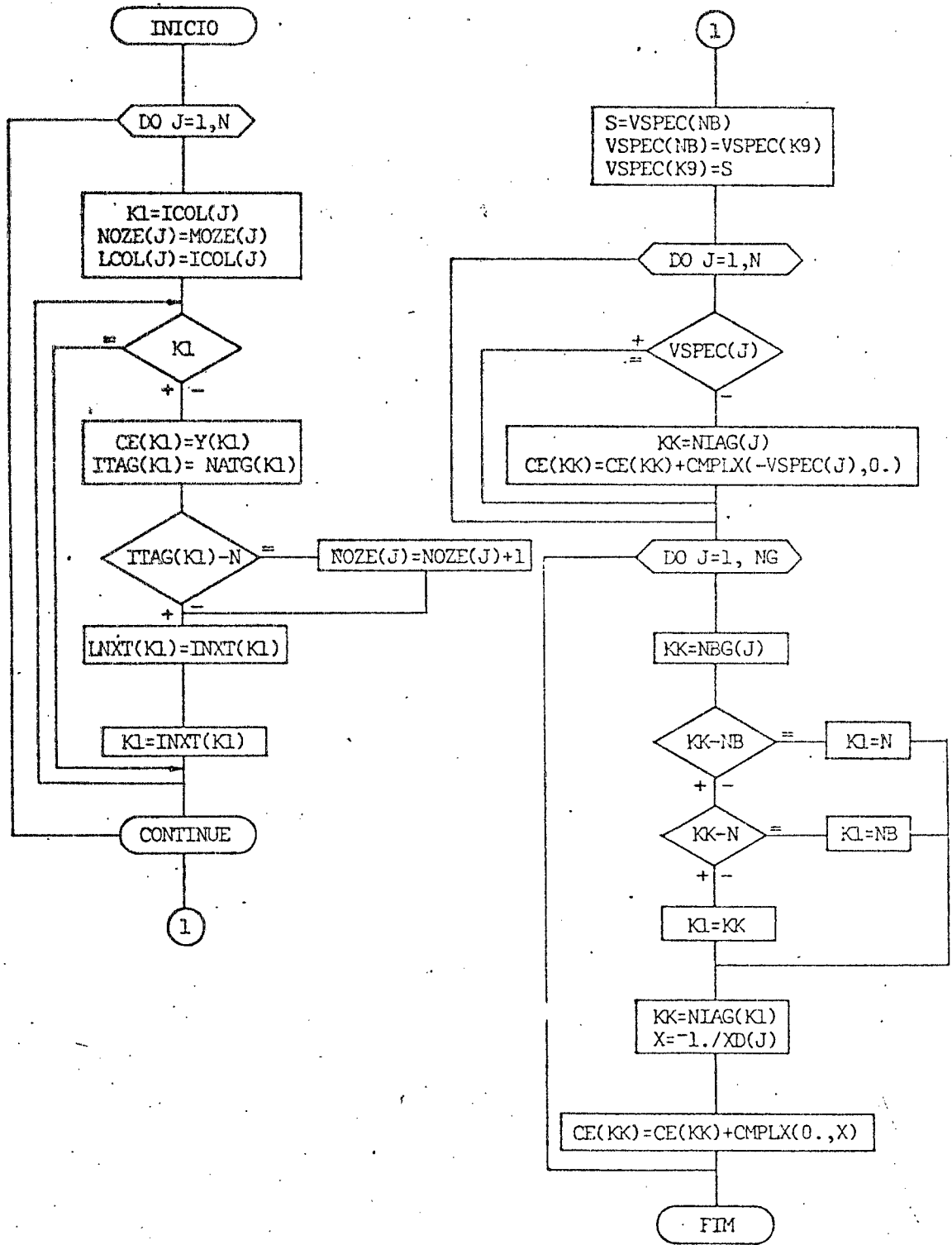


Fig. 21 - Fluxograma da subrotina TCC:

A12. QUADRO 14:

Com a estrutura do sistema alterado, conforme os quadros 10 e 13 é processada novamente a rotina RBI para a obtenção da matriz reduzida às barras internas para o sistema pós-defeito. A seguir é formada uma matriz composta apenas da parte imaginária necessária para a determinação do domínio de estabilidade.

A13. QUADRO 15: Subrotina EPP0

Esta rotina calcula o valor da energia total do sistema no instante da eliminação da falta. Este valor da energia total tem uma parcela de energia potencial e uma de energia cinética. No caso de retirada de linha a parcela correspondente à energia cinética é nula; no caso do modelo sem amortecimento, ela é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \sum M_i \omega_i^2 - \frac{1}{2} \frac{1}{M_0} \left(\sum_{i=1}^{n-1} M_i \omega_i \right)^2, \text{ onde}$$

ω_i - são as variações relativas de velocidade da máquina i para a máquina n .

$$M_0 = \sum M_i - \text{inércia total do sistema}$$

Para o modelo com amortecimento, a expressão da energia cinética é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \sum M_i \omega_i^2, \text{ onde}$$

ω_i - são as variações relativas de velocidades das máquinas em relação à velocidade síncrona.

A expressão da energia potencial é calculada por:

$$E_p = \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} [F_{ij} (-\cos(\alpha_i - \alpha_j) + \cos(\alpha_i^e - \alpha_j^e) - (\alpha_i - \alpha_j - \alpha_i^e + \alpha_j^e) + \text{sen}(\alpha_i^e - \alpha_j^e))] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} (-\cos \alpha_i + \cos \alpha_i^e - (\alpha_i - \alpha_i^e) + \text{sen} \alpha_i^e), \text{ onde}$$

$$F_{ij} = Y_{ij} \cdot E_i \cdot E_j$$

α_i - são os ângulos no ponto em que é eliminada a falta

α_i^e - são os ângulos de equilíbrio do sistema pós-falta

Variáveis:

ENER - valor da energia

ALSA - vetor dos ângulos no instante de abertura

ALFA - vetor dos ângulos referenciados à máquina n

IDF - Se for 0 + retirada de linha

- se for 1 → curto-circuito
- IAMOR - se for 0 → modelo com amortecimento
se for 1 → modelo sem amortecimento
- C → vetor das velocidades de máquinas
- ω → vetor das velocidades referenciadas à máquina \underline{n} ou a velocidade síncrona
- M → vetor de constantes da máquina ($\pi f/H$)
- YI → matriz definida por $YI(I,J) = Y_{ij} \cdot E_i \cdot E_j$
- TETA → vetor dos ângulos de equilíbrio do sistema pós-falha

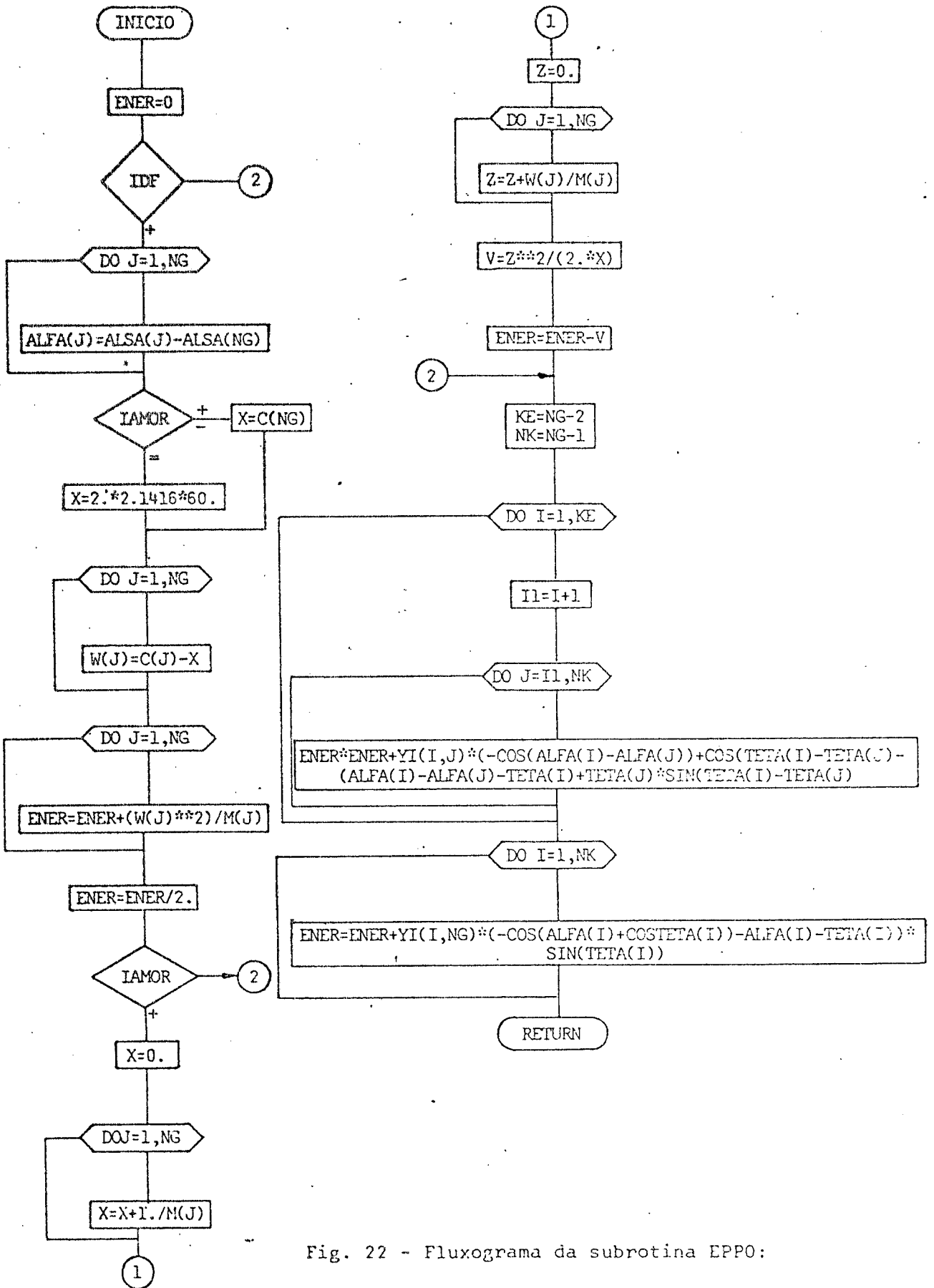


Fig. 22 - Fluxograma da subrotina EPP0:

A14. QUADRO 16: Subrotina DEST

O processamento do domínio de estabilidade é feito através de uma rotina principal DEST e das rotinas auxiliares LIMIT, ORD1, ORD2, CGRAD, MJACO, SUBS, LU, CENER, TL2, MLIST e MONT.

Os dados de entrada para a rotina são:

- matriz reduzida às barras internas (parte imaginária);
- tensões de barras desejadas;
- vetor de ângulos internos das barras para o qual se deseja determinar o domínio de estabilidade.

A matriz reduzida é obtida no quadro 15; o vetor de tensões é especificado e os ângulos internos são obtidos no quadro 13.

A saída da rotina é na forma de uma variável ENER, que dá o valor numérico de um nível de energia o qual define o domínio de estabilidade do sistema para o ponto de operação definido pelos vetores de tensões e de ângulos internos.

Descrição das rotinas auxiliares:

- LU

Rotina que faz a fatoração LU da matriz Y. As matrizes L e U são armazenadas na própria matriz Y que originalmente contém o jacobiano calculado na origem. Esta matriz permanece inalterada durante o resto do processamento.

Variáveis:

Y - matriz jacobiana que é transformada para guardar L e U.

NM - ordem do jacobiano (Y)

Subrotina MONT:

Nesta rotina é montada a matriz jacobiana calculada no ponto de equilíbrio para ser usada no problema de tangência. Também são obtidos os f_{ij} do sistema em forma de vetor e em forma de matriz, isto é feito para facilitar o cálculo em outras rotinas: Fórmulas usadas:

$$f_{ij} = Y_{ij} \cdot E_i \cdot E_j$$

$$j_{ij} \text{ para } i \neq j$$

$$j_{ij} = -f_{ij} \cos(\alpha_i - \alpha_j)$$

$$\text{para } i = j$$

$$j_{ij} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} f_{ij} \cos(\alpha_i - \alpha_j) + f_{in} \cos \alpha_i$$

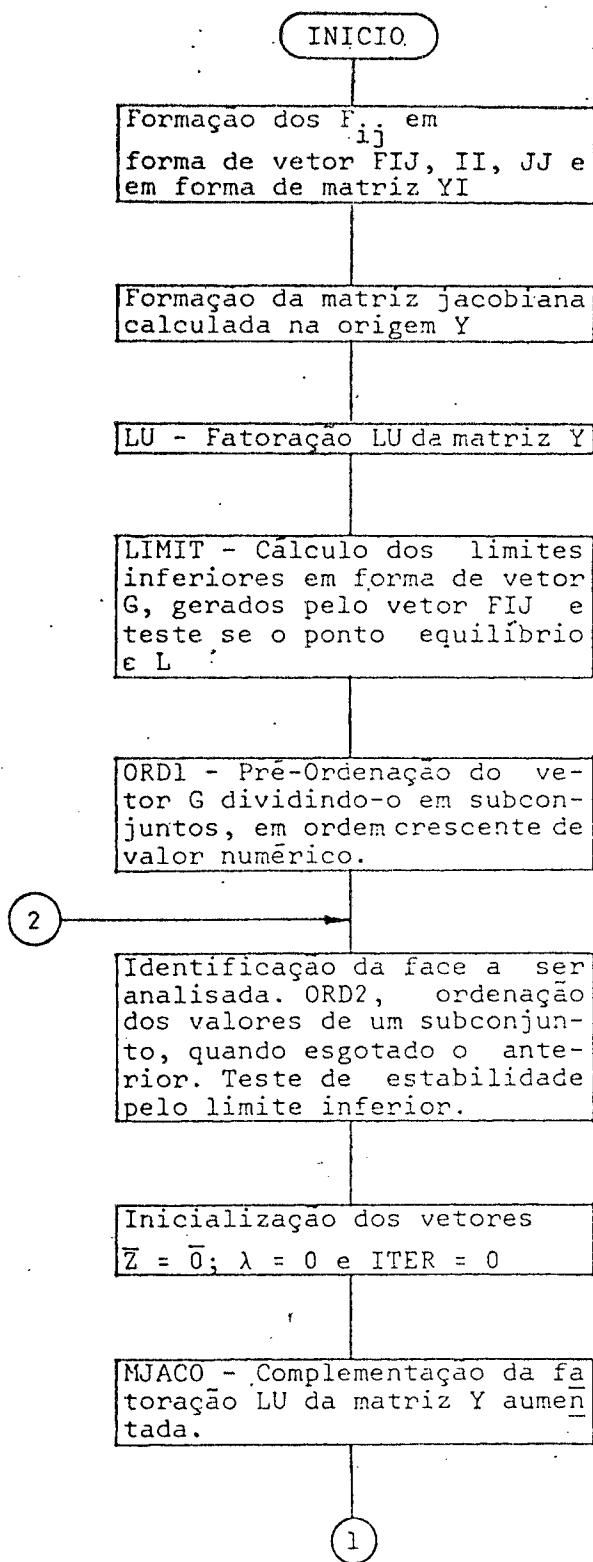


Fig. 23 - Fluxograma da subrotina DEST:

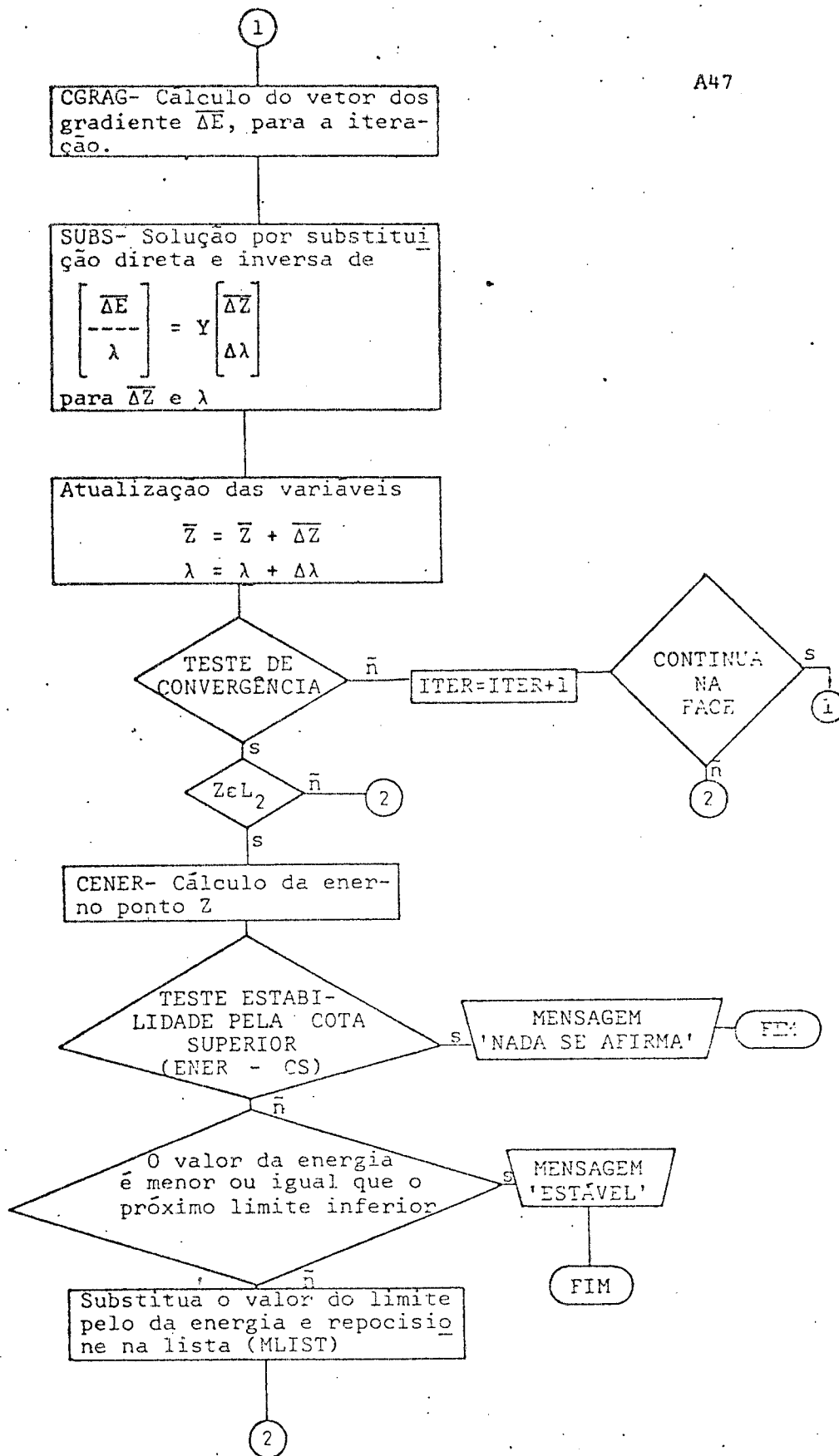


Fig. 24 - Continuação da subrotina DEST:

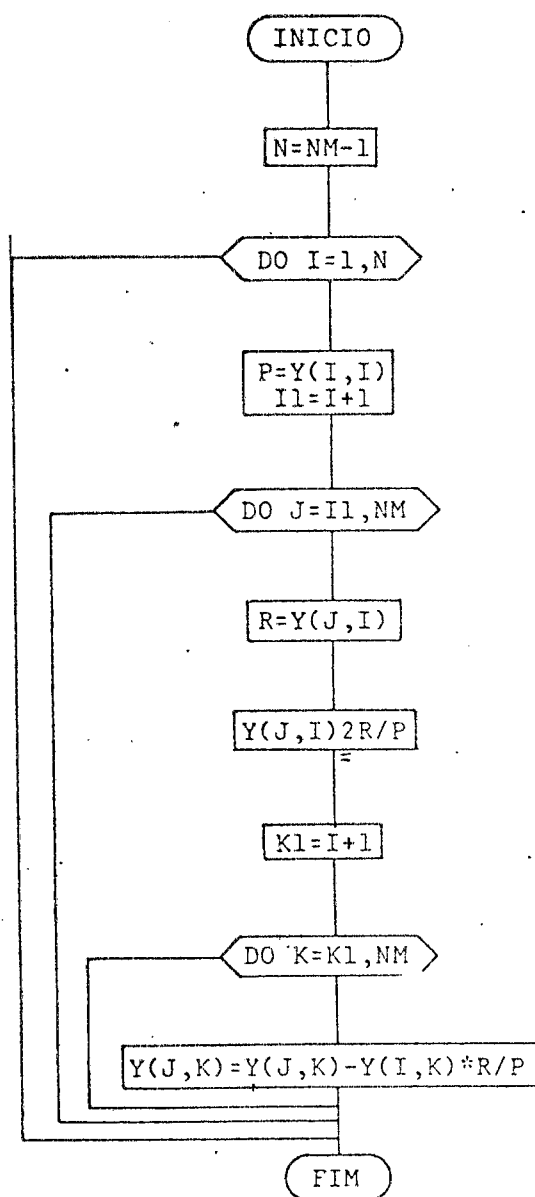


Fig. 25 - Fluxograma da subrotina LU:

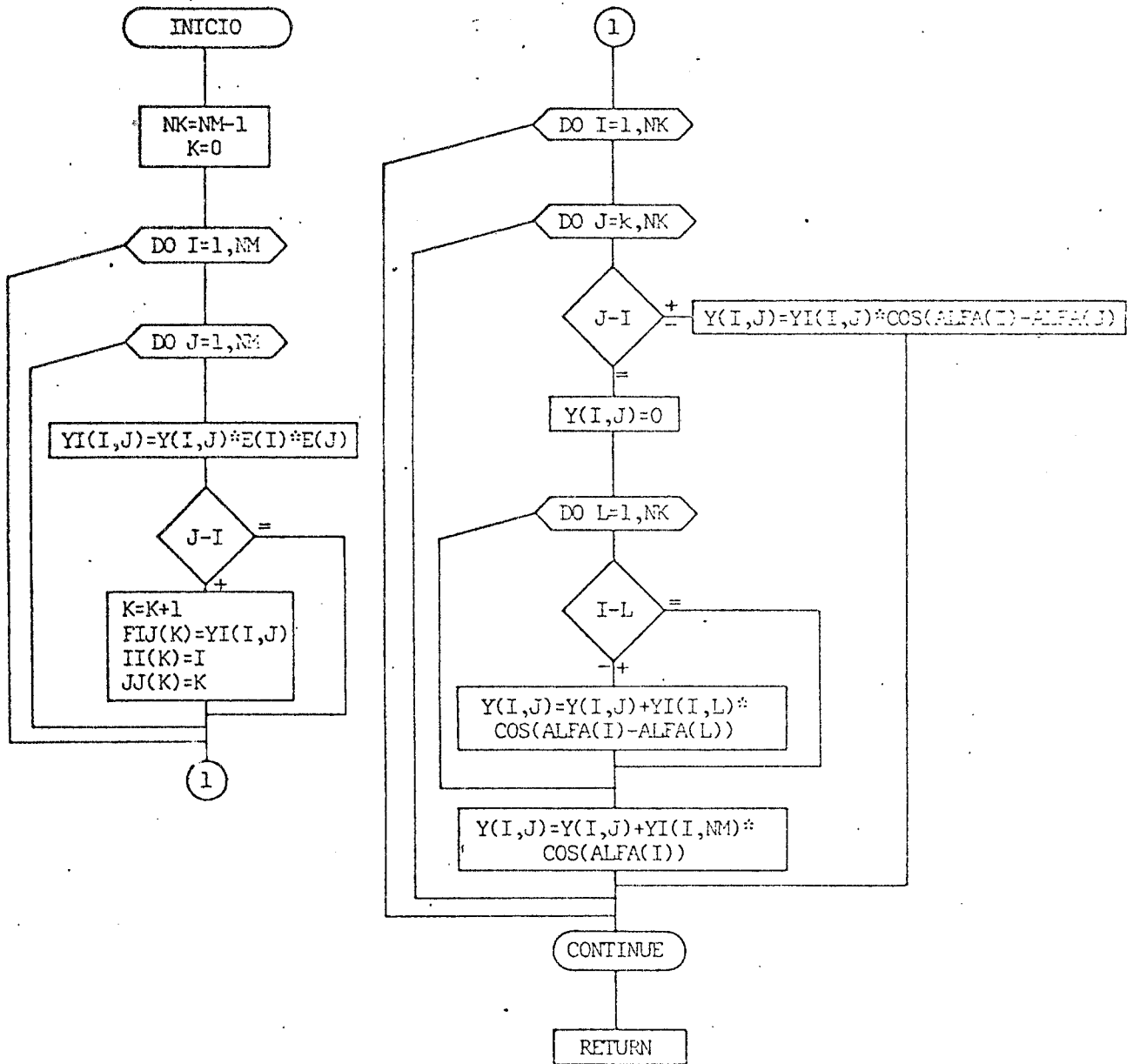


Fig. 26 - Fluxograma da subrotina MONT:

- LIMIT:

Esta rotina calcula os limites inferiores correspondente as faces indicadas pelo vetor FIJ. A cada elemento de FIJ correspondem dois limites inferiores; estes dois valores já sofrem uma pré-ordenação sendo colocado na primeira metade do vetor G o de menor valor numérico e o segundo na outra metade. Ela também testa se o ponto de equilíbrio pertence a L.

Variáveis:

- M - número de elementos de F_{ij}
- II - vetor paralelo a FIJ que define as faces
- JJ - idem a II
- NM - ordem do jacobiano Y
- ALFA - vetor dos ângulos internos de máquina
- LADO - vetor que define a posição dos limites inferiores quanto os lados.
- FACE - vetor que define as faces dos limites
- F1 - vetor auxiliar
- G - vetor dos limites inferiores
- IND - se sair com zero - ALFA e L
se sair com um = ALFA e L

- ORD1:

Esta rotina faz uma pré-ordenação dos limites inferiores, dividindo-os em subconjuntos que estão em ordem crescente quanto aos valores numéricos. Os valores são selecionados tendo como referência a média do conjunto, formando a partir daí o sub-conjunto dos valores acima da média e o sub-conjunto dos valores abaixo da média, este último é particionado com o mesmo critério e o processo continua até que o último sub-conjunto tenha um número mínimo de elementos estipulado.

Variáveis

- G, FACE, LADO - como descritos anteriormente
- N - número de limites inferiores
- KP - vetor que define posições iniciais dos subconjuntos no vetor G.
- GM - vetor que define valores máximos nos subconjuntos.

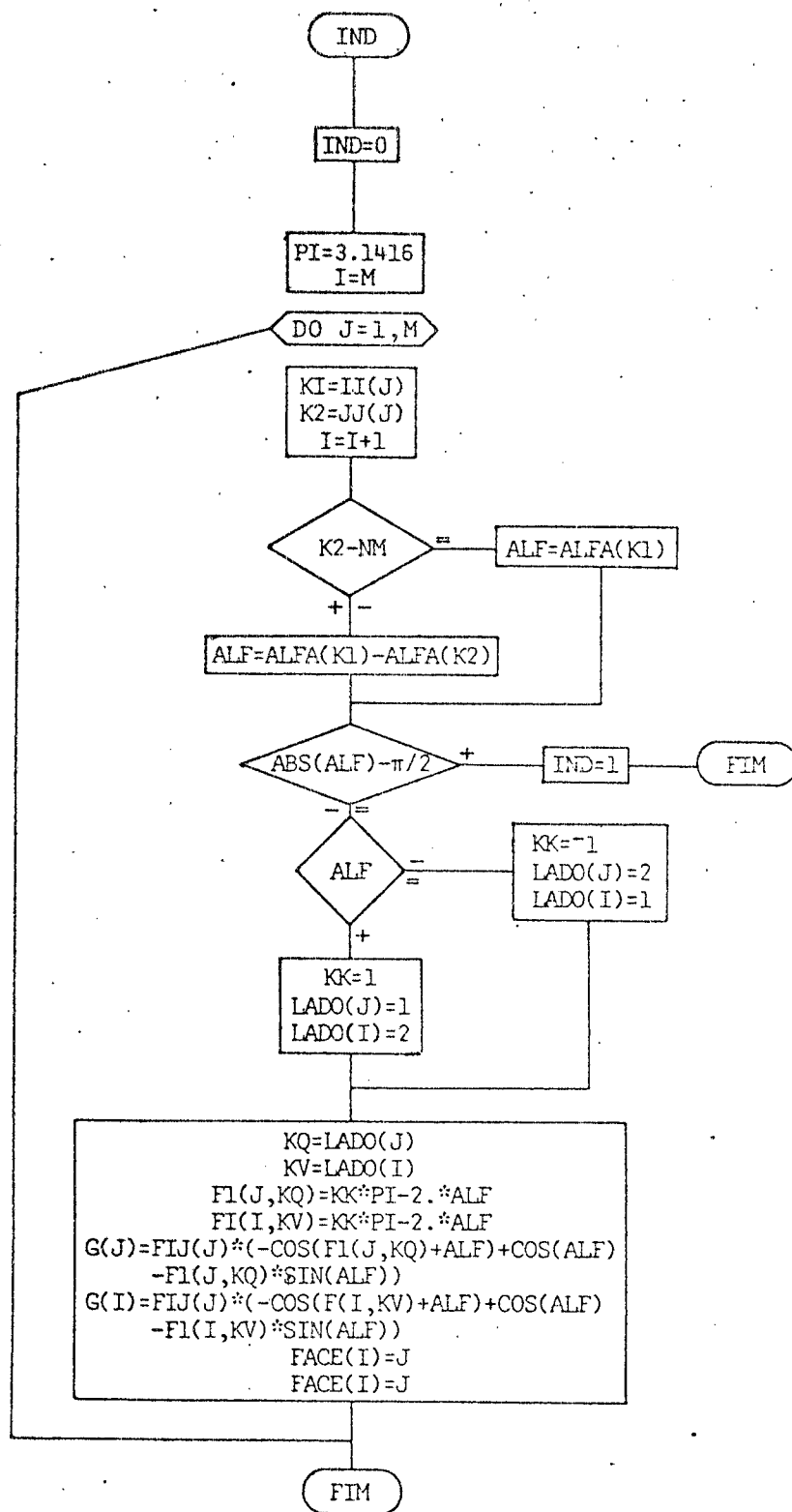


Fig. 27 - Fluxograma da subrotina LIMIT:

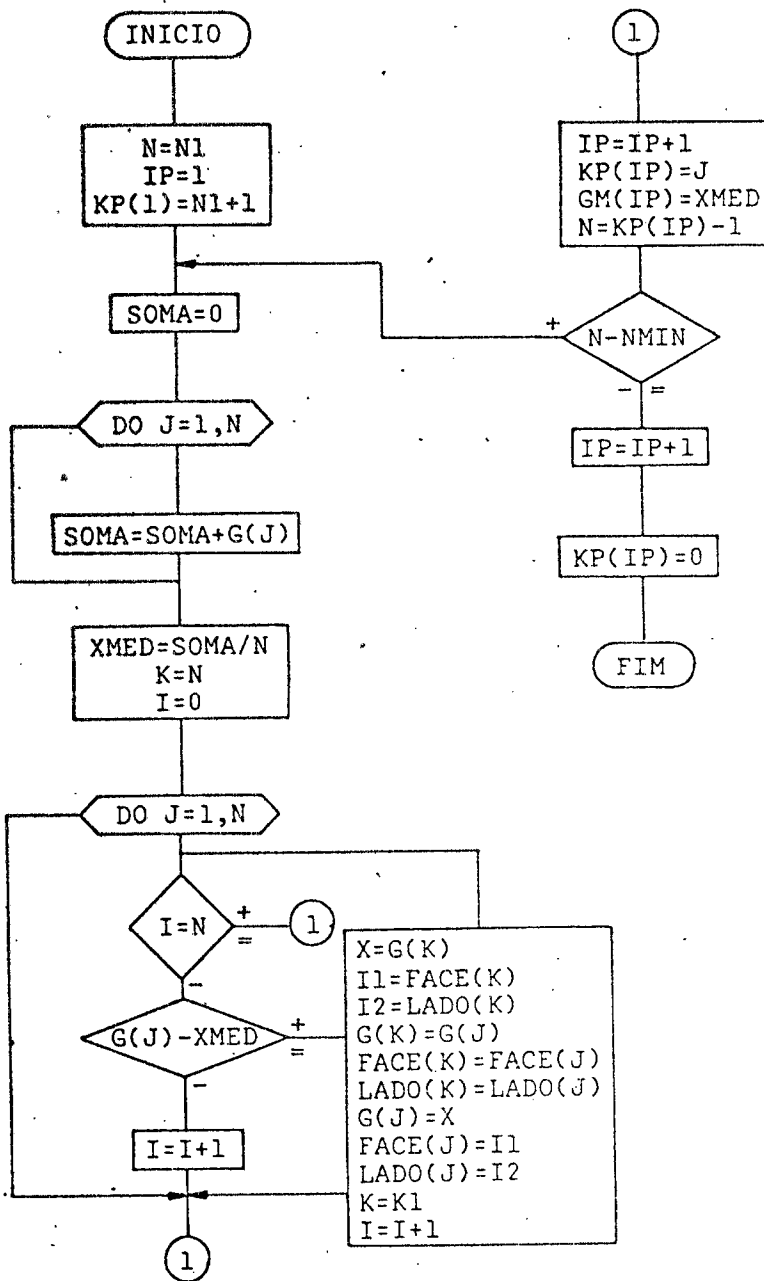


Fig. 28 - Fluxograma da subrotina ORD1

- IP - número de subconjuntos
- I - contador em ordem crescente de enchimento do vetor dos valores abaixo do valor médio.
- K - contador em ordem inversa de enchimento do vetor dos valores acima do valor médio.
- NMIN - número abaixo do qual os subconjuntos não são mais particionados.

- ORD2:

Esta rotina classifica os valores de um subconjunto em ordem crescente, deixando o subconjunto pronto para ser acessado valor por valor.

Variáveis:

- G - vetor dos limites inferior
- LADO - vetor que indica o lado de G
- FACE - vetor que indica a face de G
- j1 - posição inicial em G do subconjunto a ser ordenado
- j2 - posição final menos um em G do subconjunto a ser ordenado
- K - variável que indica se existem valores a serem ordenados ainda.

- MJACO:

MJACO faz a complementação da fatoração LU da matriz Y feita na rotina LU; esta complementação é devida ao fato da matriz Y ser aumentada de uma linha e de uma coluna. Esta linha e esta coluna não alteram os valores das matrizes L e U da matriz Y primitiva, bastando portanto, encontrar a linha da matriz L e a coluna da matriz U. Isto é feito utilizando-se dos valores conhecidos das matrizes L e U e dos elementos desta linha e coluna adicionados.

Variáveis:

- Y - matriz jacobiana aumentada, na forma das matrizes L e U.
- NM - ordem da matriz jacobiana
- K1, K2 - parâmetros que definem a face para a qual a matriz Y deve ser calculada.

- CGRAD:

Esta rotina monta o vetor gradiente de energia, a partir dos F_{ij} na sua forma matricial YI, dos ângulos internos α (vetor ALFA) e das variáveis Z (vetor Z). As fórmulas usadas foram:

$$\Delta E_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} [\text{sen}(Z_{ij} + \alpha_{ij}^e) - \text{sen} \alpha_{ij}^e] + F_{in} [\text{sen}(Z_i + \alpha_i^e) - \text{sen} \alpha_i^e]$$

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

$$\Delta E_k = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{kj} [\text{sen}(Z_{kj} + \alpha_{kj}^e) - \text{sen} \alpha_{kj}^e] + F_{kn} [\text{sen}(Z_k + \alpha_k^e) - \text{sen} \alpha_k^e] + \lambda$$

$$\Delta E_p = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{pj} [\text{sen}(Z_{pj} + \alpha_{pj}^e) - \text{sen} \alpha_{pj}^e] + F_{pn} [\text{sen}(Z_p + \alpha_p^e) - \text{sen} \alpha_p^e] - \lambda$$

$$\Delta E_n = Z_k - Z_p - [\pm \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e)], \text{ onde}$$

k, p são as faces do politopo que estão em análise; em alguns casos existe apenas a face k .

λ multiplicador de Lagrange.

O sinal do termo $[\pm \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e)]$ depende do lado do limite inferior que esta sendo analisado e, portanto, o valor da expressão é introduzida na rotina em forma de uma variável previamente calculada.

Variáveis:

GRAD - vetor dos gradientes (ΔE)

N - ordem da matriz Y aumentada

YI - matriz dos F_{ij}

Z - vetor das variáveis Z

ALFA - vetor dos ângulos internos

RLAMB - multiplicador de Lagrange λ

K1, K2 - variáveis que identificam a face do politopo analisada

VV - variável que introduz o valor da expressão $[\pm \pi - 2 (\alpha_k^e - \alpha_p^e)]$ ou $[\pm \pi - 2 \alpha_k^e]$

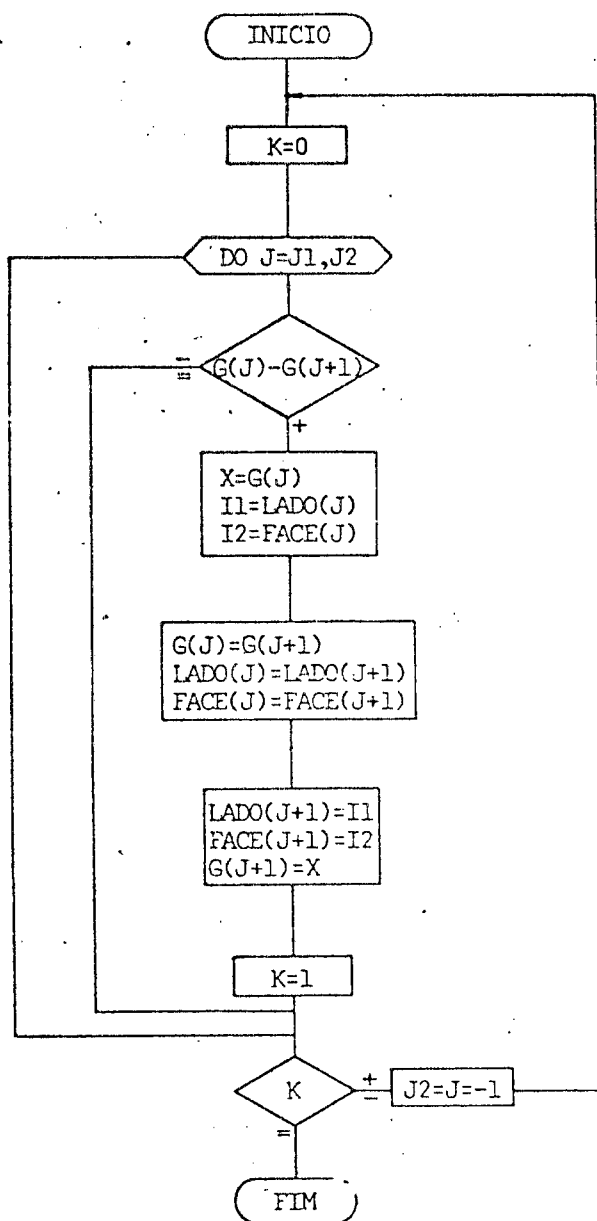


Fig. 29 - Fluxograma da subrotina ORD2:

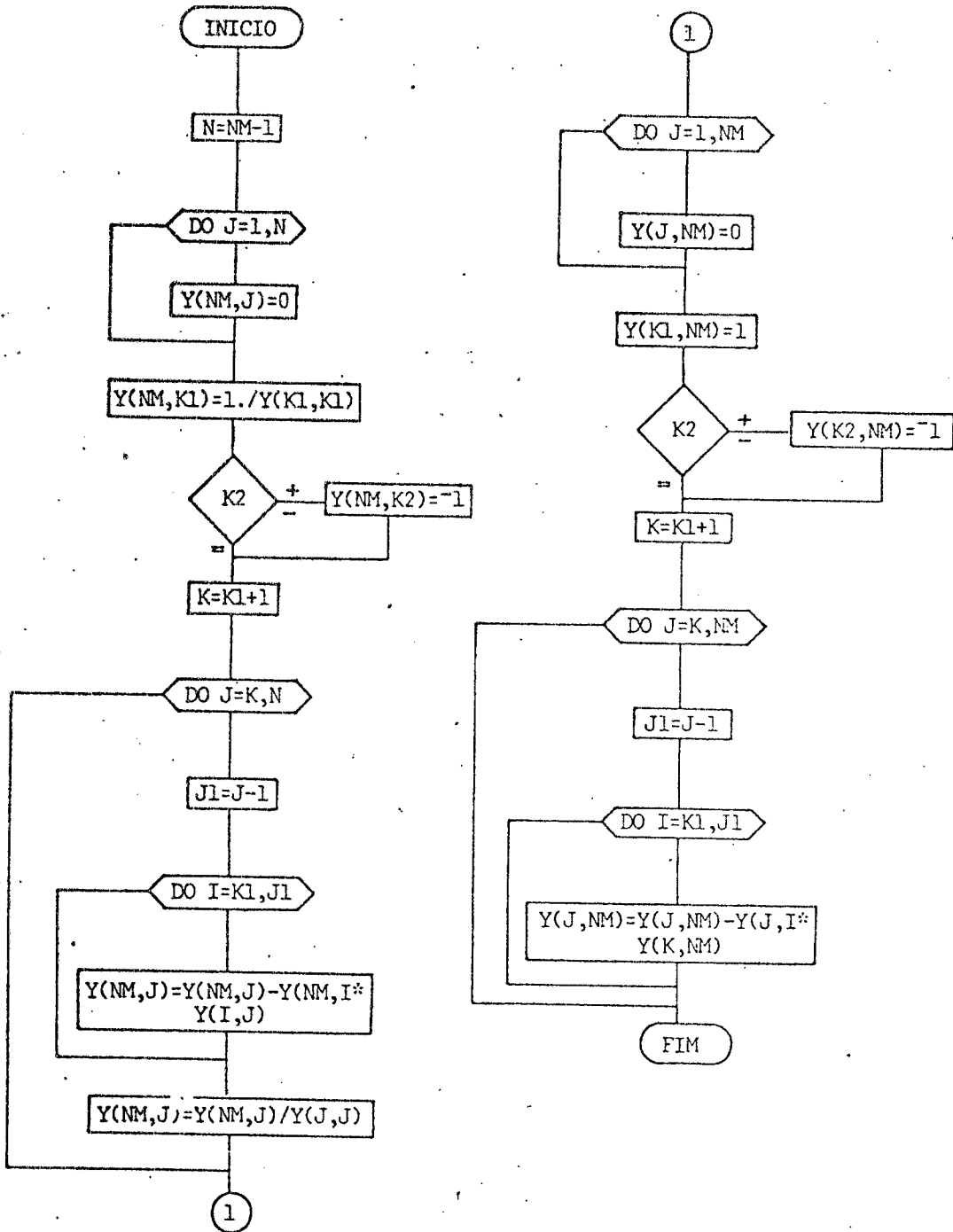


Fig. 30 - Fluxograma da subrotina MJACO

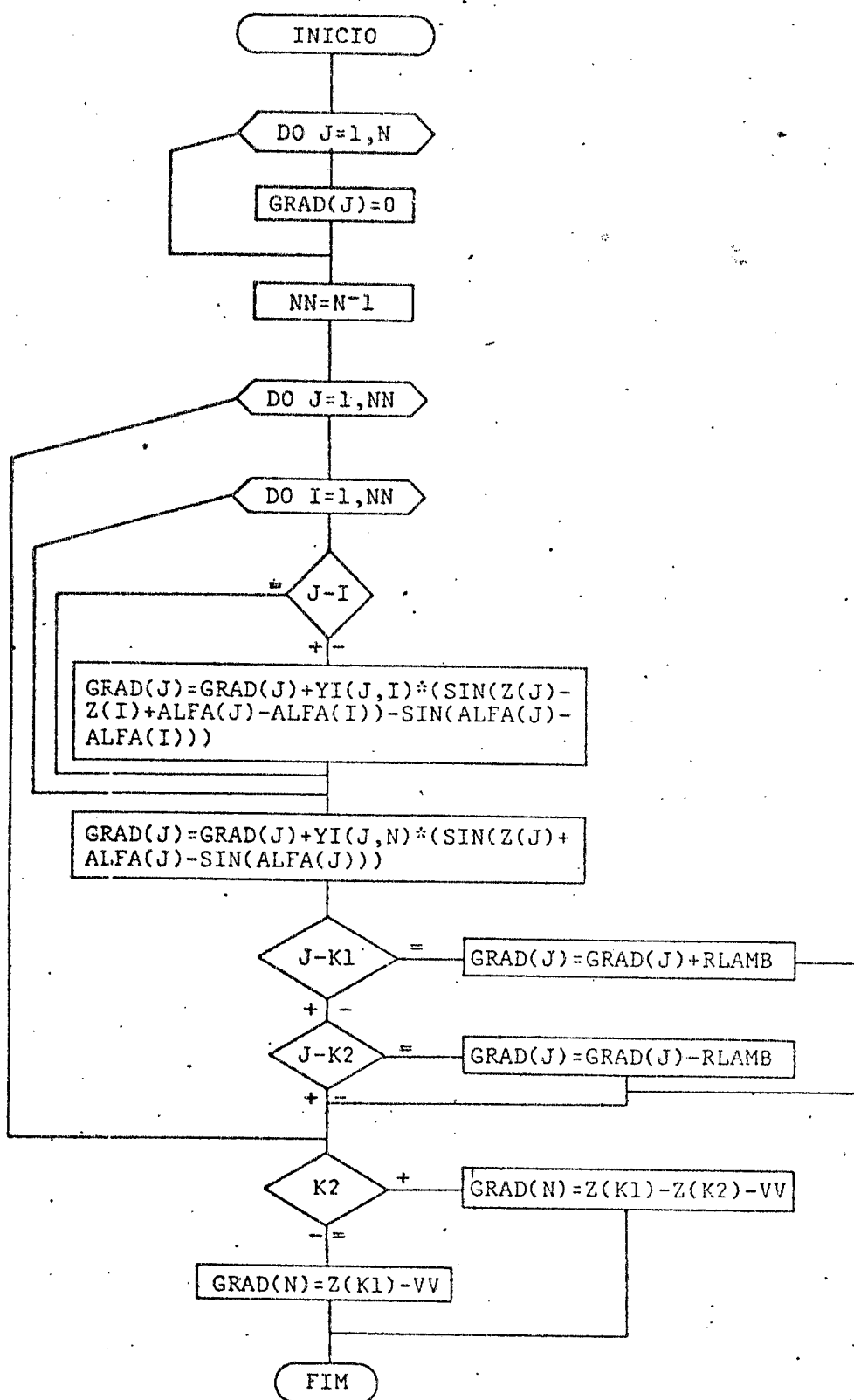


Fig. 31 - Fluxograma da subrotina CGRAD

- SUBS:

Esta rotina resolve por substituição direta e inversa a equação matricial $\begin{bmatrix} \Delta E \\ \lambda \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$, onde ΔE e λ são conhecidos; a matriz Y aumentada é conhecida na forma de suas matrizes LU . Tem-se então: $\begin{bmatrix} \Delta E \\ \lambda \end{bmatrix} = LU \begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$, de onde $L^{-1} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \lambda \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$, fazendo $X = U \begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$, tem-se $L^{-1} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \lambda \end{bmatrix} = X \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta E \\ \lambda \end{bmatrix} = LX$ de onde por substituição direta obtém-se X , e então em $X = U \begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$ por substituição inversa obtém-se $\begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$, o vetor das incógnitas.

Variáveis:

- NM - ordem da matriz Y aumentada
 GRAD - vetor gradiente de energia na entrada da rotina; na saída é o vetor das variáveis Z e sua última posição é a variável λ .
 Y - matriz jacobiana aumentada, na forma de suas matrizes L e U .

- Subroutine TL2:

Esta rotina verifica se o ponto de tangência pertence ao politopo L_2 . Onde

$$L_2 = \{ \alpha \mid |\alpha_i| < \pm \pi - 2 \alpha_i^e, |\alpha_i - \alpha_j| < \pm \pi - 2 (\alpha_i^e - \alpha_j^e) \}$$

Variáveis

- K - número de faces do politopo
 II, JJ - vetores indicadores de faces
 NM - número de máquinas
 Z - vetor dos ângulos a serem testados
 Fl - vetor que identifica a face do politopo
 IND - indicador, se zero - não pertence a L_2
 se um - pertence a L_2 .

- Subroutine CENER:

Nesta rotina é calculado o valor da energia potencial no ponto de tangência. A expressão usada é:

$$E_p = \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} [-\cos(z_i - z_j + \alpha_i^e - \alpha_j^e) + \cos(\alpha_i^e - \alpha_j^e) - (z_i - z_j) \times \sin(\alpha_i - \alpha_j)] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} [-\cos(z_i + \alpha_i^e) + \cos \alpha_i^e - z_i \times \sin \alpha_i^e]$$

Variáveis:

- NM - número de máquinas
 ENER - valor da energia no ponto de tangência
 Z - vetor dos ângulos no ponto de tangência
 ALFA - vetor dos ângulos de equilíbrio do sistema

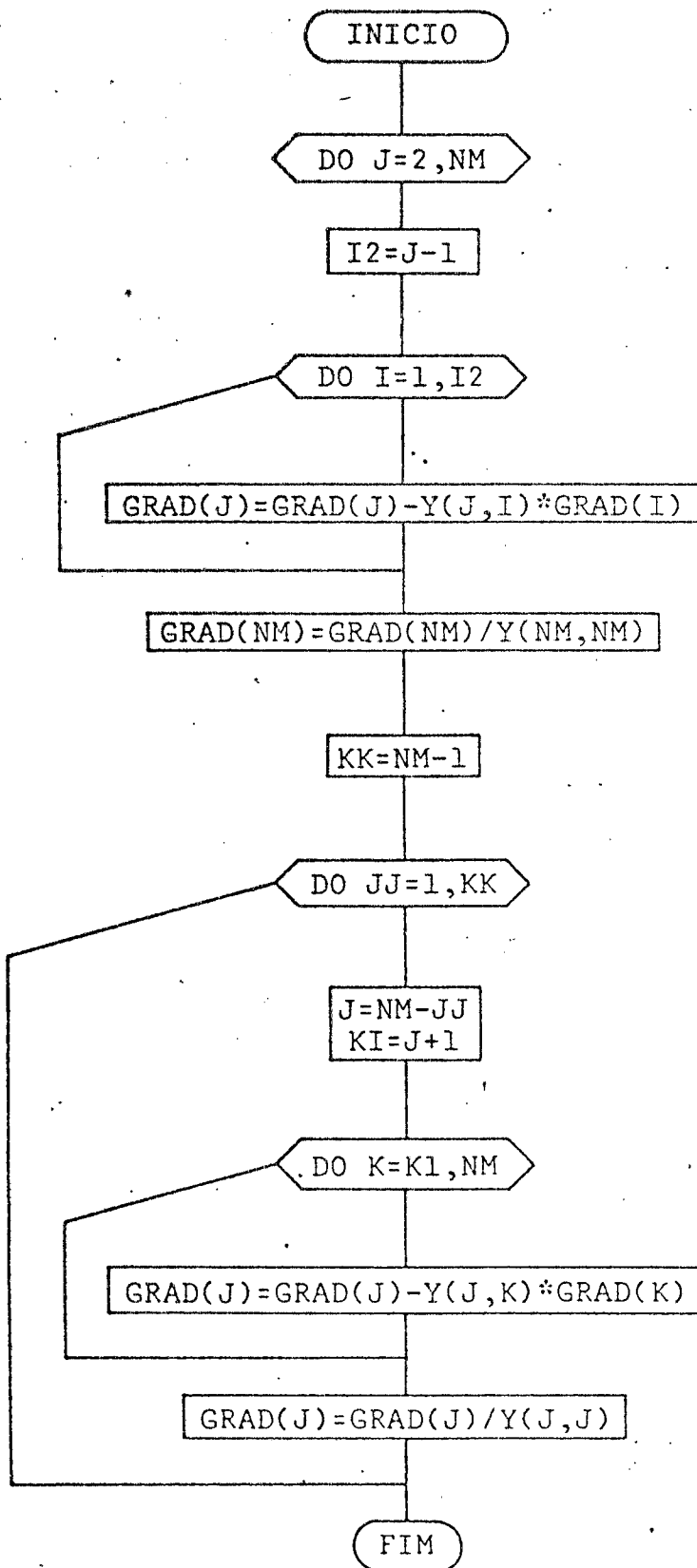


Fig. 32 - Fluxograma da subrotina SUBS

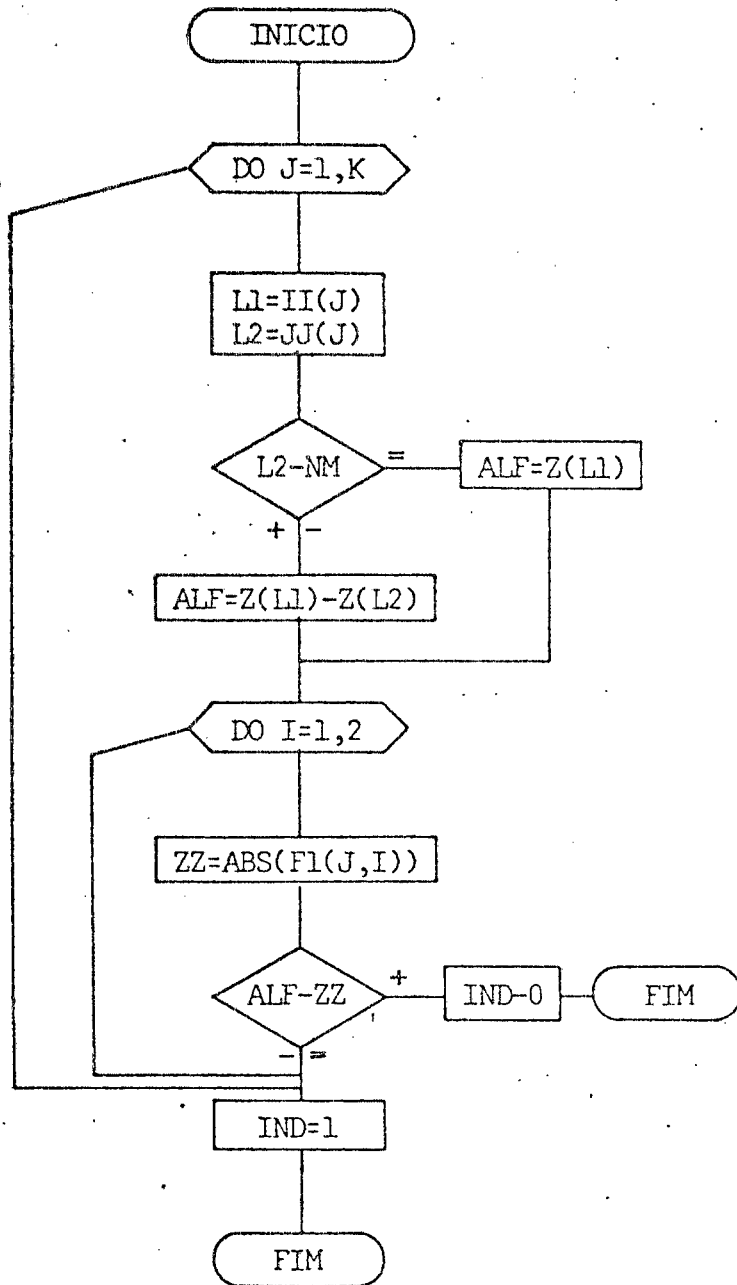


Fig. 33 - Fluxograma da subrotina TL2:

pós-falta.

- MLIST

Quando o valor de um limite inferior é trocado pelo valor da energia calculada no ponto de tangência desta face, o mesmo deve ser reposicionado na lista ordenada dos limites inferiores. A rotina MLIST faz isto descobrindo a que subconjunto pertence o limite em questão e alocando o mesmo neste subconjunto. Para isto o vetor sofre modificações que são concentradas no primeiro e no último elemento do subconjunto, evitando assim de mexer em todas as posições para a inclusão de um novo elemento.

Variáveis:

- G - vetor dos limites inferiores
- IP - número de subconjuntos em G
- JG - subconjunto ao qual pertence o limite que deve ser reposicionado
- IG - posição em G do limite analisado
- KP - Vetor indicador da posição inicial dos subconjuntos

A15. QUADRO 17:

Neste quadro é feita a reconstituição dos dados do sistema, alterados quando da retirada de uma linha no processamento do caso anterior. Esta reconstituição é feita pela re-introdução dos dados da linha nos vetores padrões.

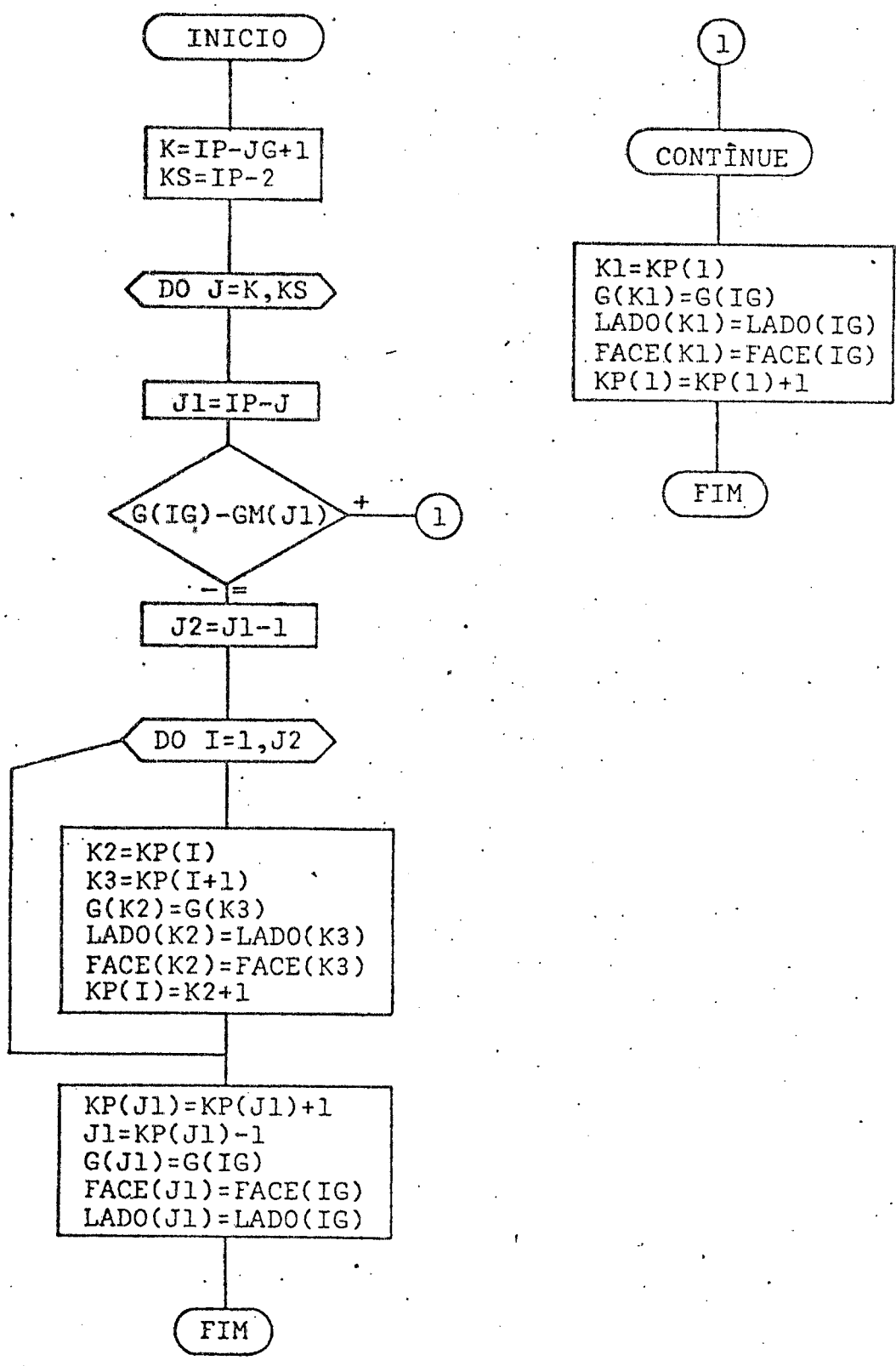


Fig. 35 - Fluxograma da subrotina MLIST:

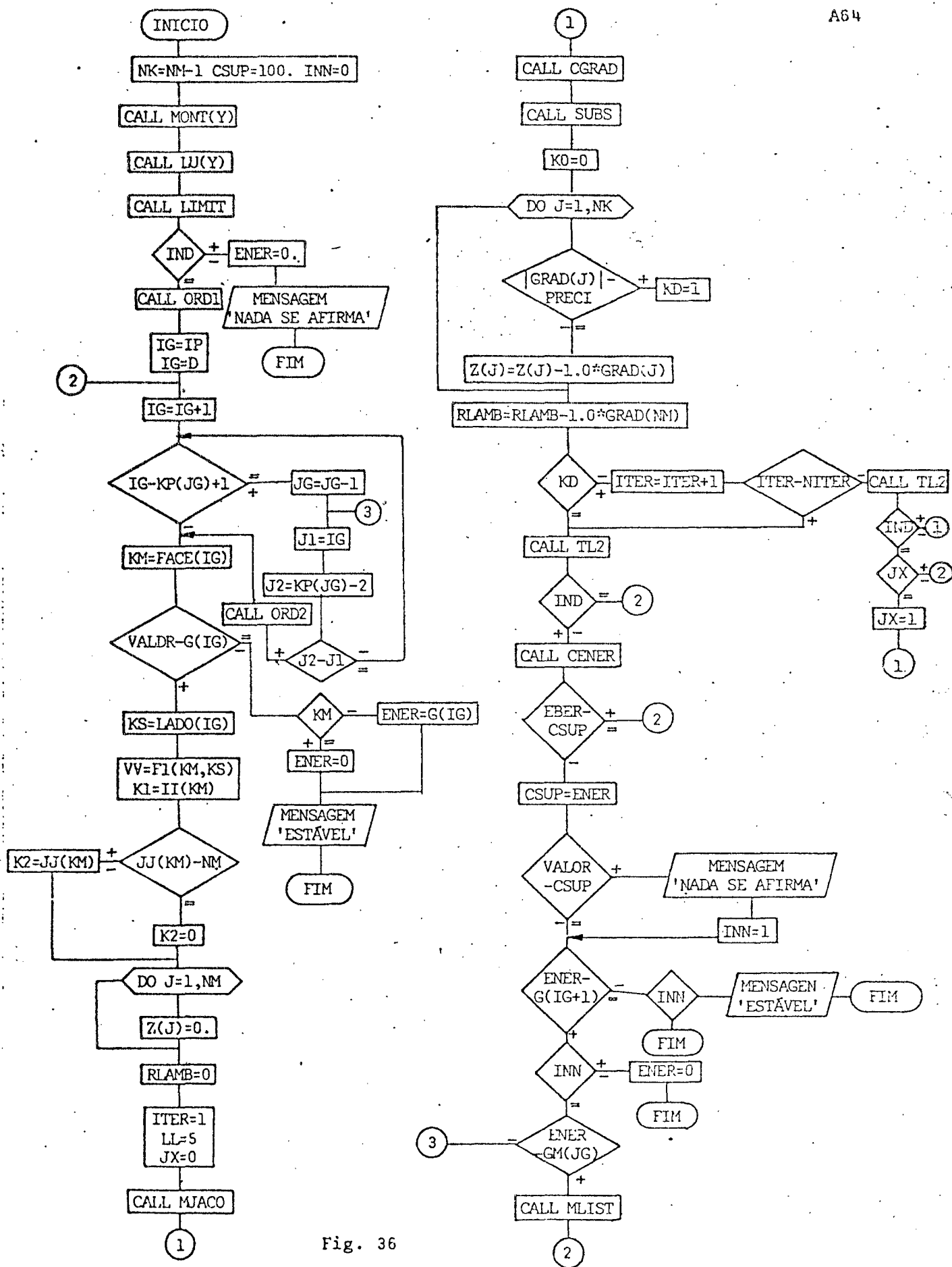


Fig. 36