

TESE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

243

REDESPACHO SOB CONTINGÊNCIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



AUTORA: SELMA G. GARCIA TEDESCHI

ORIENTADOR: Prof. HECTOR ARANGO

CO-ORIENTADOR: Prof. ANTONIO E. HERMETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

REDESPOJO SOB CONTINGÊNCIA

AUTORA: SELMA GALLETI GARCIA TEDESCHI

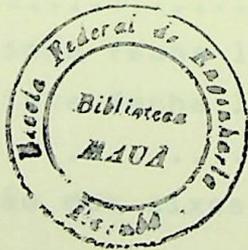
ORIENTADOR: Prof. HECTOR ARANGO

CO-ORIENTADOR: Prof. ANTONIO EDUARDO HERMETO

1979

INDICE

	Pág.
CAPITULO I	
I.1	Introdução
I.2	Análise de contagem
I.3	Ações de controle
I.4	Método Investigado
CAPITULO II	
II.1	Introdução
II.2	Rotina de montagem de matriz
II.2.1	Pesquisa rápida no lista de linhas de grama
II.2.2	Seqüência de processamento das barras
II.2.3	Estrutura de armazenamento de matriz
II.3	Subrotina
II.3.1	Seleção das barras relevantes
II.3.2	Subrotina de leitura
II.3.3	Subrotina de integração de linhas
II.3.3.1	Incorporação de uma linha radial
II.3.3.2	Incorporação de uma linha radial ligada a referência
II.3.3.3	Incorporação de uma linha radial ligada a barra de referência
II.3.3.4	Incorporação de uma linha radial ligada a barra de referência
II.3.4	Subrotina de eliminação de barras irrelevantes
CAPITULO III	
III.1	Associação
III.2	Introdução
III.3	Desenvolvimento do algoritmo
III.3.1	Desenho de aplicação do algoritmo
III.4	Aspectos computacionais
III.4.1	Cálculo dos endereços de acesso às variáveis
III.4.1.1	Subrotina de cálculo das variáveis
III.4.1.2	Subrotina de cálculo das variáveis



SELICA GALLETTI
NELSON GARCIA,

- In memoriam -

INDICE

	Pág.
<u>CAPÍTULO I</u>	
1.1	Introdução 01
1.2	Análise de contingência 03
1.3	Ações de controle 05
1.4	Método Investigado 07
<u>CAPÍTULO II</u>	
II.1	Introdução 10
II.2	Rotina de montagem da matriz 11
II.2.1	Pesquisa rápida na lista de linhas do sistema.. 12
II.2.2	Sequência de processamento das barras 14
II.2.3	Estrutura de armazenamento da matriz 17
II.3	Subrotina 20
II.3.1	Seleção das barras relevantes 20
II.3.2	Subrotina de costura 21
II.3.3	Subrotinas de incorporação de linhas 22
II.3.3.1	Incorporação de uma linha radial 23
II.3.3.2	Incorporação de uma linha radial ligada a re- ferência 23
II.3.3.3	Incorporação de uma linha fecha laço 24
II.3.3.4	Incorporação de uma linha fecha laço com a bar- ra de referência 25
II.3.4	Subrotina de eliminação dos eixos e irrelevan- tes 25
<u>CAPÍTULO III</u>	
III.1	Nomenclatura 27
III.2	Introdução 28
III.3	Desenvolvimento do algoritmo 31
III.3.1	Exemplo de aplicação do algoritmo 39
III.4	Aspectos computacionais 46
III.4.2	Cálculo dos acréscimos de corrente nas linhas limitativas 48
III.4.2.1	Subrotina de cálculo dos termos modificantes de ZILI 48

III.4.2.1a	Múltipla	48
III.4.2.1b	Simples	51
III.4.2.2	Cálculo das diferenças entre as quedas de ten sões	52

CAPÍTULO IV

IV.1	Introdução	53
IV.2	Formulação matemática	54
IV.2.1	Restrições	55
IV.2.1.1	Limite de segurança nas linhas	55
IV.2.1.2	Limites das gerações	56
IV.2.2	Função Objetiva	56
IV.3	Método gradiente projetado	57
IV.4	Exemplo de aplicação do algoritmo	67

CAPÍTULO V

V.1	Conclusões	76
V.2	Exemplo de Aplicação	77
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	83

x.x.x.x.x.x.x.x.x

C A P Í T U L O I

1-1 INTRODUÇÃO

Um dos principais interesses na operação dos sistemas elétricos de potência (S.E.P.), hoje em dia, é a segurança. A meta básica é atingir a demanda da carga, mantendo a qualidade do serviço aceitável.

Um sistema elétrico de potência sofre contínuas variações em seu estado permanente de operação. As causas dessas mudanças podem ser as mais diversas: alterações nas demandas das cargas, reprogramação da geração, desconexões de linhas de transmissão ou de transformadores, para manutenção ou por atuação do sistema de proteção e outras. Os efeitos desses distúrbios são investigados, tanto no planejamento, como na operação do sistema, para que não afetem a segurança, e portanto a qualidade do serviço.

Entende-se por contingência num S.E.P., a saída ou entrada no sistema de um ou mais componentes, sejam linhas de transmissão, geradores, transformadores, cargas e etc.

Um estudo de contingência consiste numa avaliação, da segurança da operação de um determinado estado permanente, isto é, a capacidade do sistema suportar contingências não planejadas sem haver perdas parciais ou totais de carga ou transgredir as restrições de operação(*).

(*) As restrições de operação estipulam que as variações de frequência e tensão devem permanecer dentro das tolerâncias pré-estabelecidas e que o uso dos componentes não podem ultrapassar de certos limites.

O grau desejável de segurança de um sistema é proveniente dos critérios adotados. Uma classificação dos estados de segurança de um S.E.P. foi introduzida por T.E.Dy Liacco(13). Quatro estados de segurança podem ser definidos; são eles:

ESTADO NORMAL: onde a demanda e as restrições de operação estão satisfeitas, e no caso de uma contingência, o sistema continua operando, respeitando as restrições de carga e operação.

ESTADO DE ALERTA: ainda são satisfeitas a demanda e restrições de operação, mas a próxima contingência levará o sistema para um estado de emergência.

ESTADO DE EMERGÊNCIA: neste algumas cargas não são atendidas e/ou os componentes estão sobrecarregados, ou a qualidade do serviço, em termos de tensão e frequência, vem deteriorando.

ESTADO DE RESTAURAÇÃO: é o estado seguinte à emergência no qual a deteriorização das características do sistema foi detida, mas as condições de operação ainda não são normais.

Os estados de operação e as transições entre eles podem ser visualizadas na Figura(1.1). As transições são causadas por contingências ou ações de controle.

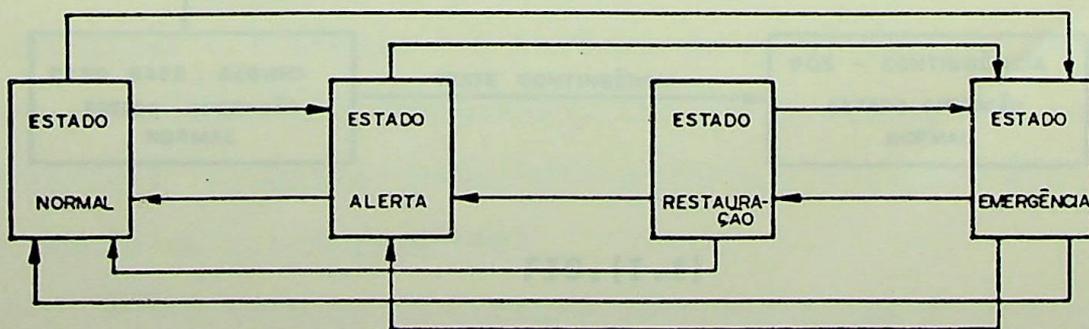


FIG.(1.1) -As transições para a direita são causadas por contingências e as para a esquerda por ações de controle.

1-2 ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA

Esta análise consiste em obter as alterações nas tensões e fluxos de potências, correspondentes às diversas condições e contingências, especificadas para um determinado estado de operação, denominado caso base. Uma lista contendo linhas de transmissão, unidades geradoras, transformadores, barramentos e outros componentes, cuja saída(ou entrada) do sistema devem ser simulados e para cada caso a solução do fluxo de carga é obtida.

O caso base é considerado seguro se nos testes efetuados o novo estado de operação for normal. No caso de ser detectado, após a contingência, um estado de emergência, o caso base não mais é seguro e ações de controle devem ser tomadas para levá-lo a um estado normal de operação.

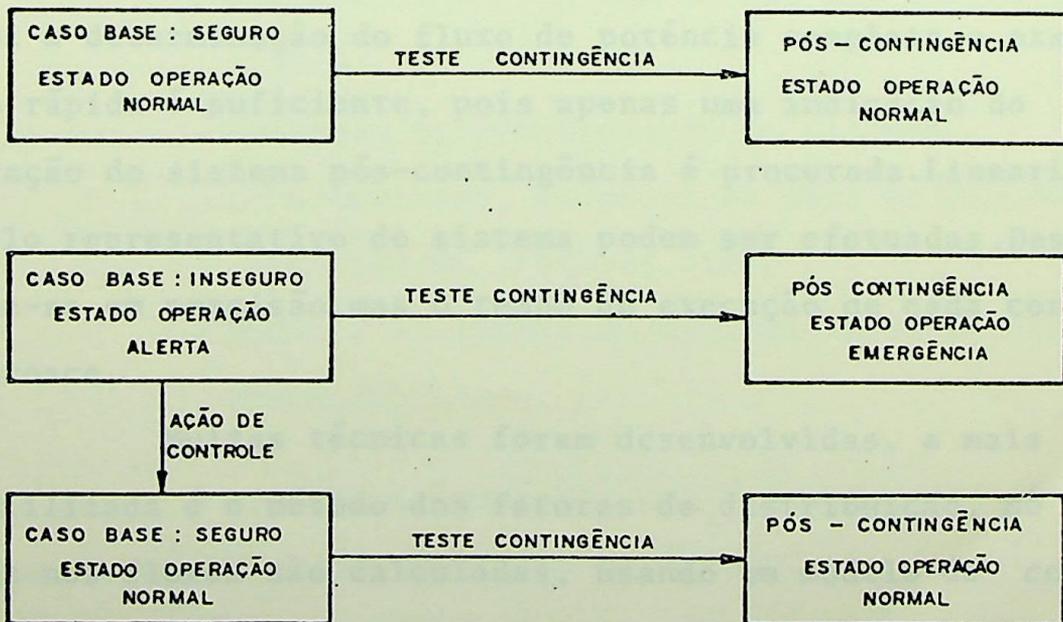


FIG. (1.2)

Um estudo de contingência, entretanto, não fornece nenhuma indicação direta das correções a serem empregadas, apenas apresenta um diagnóstico da segurança da operação do sistema. A te

rapia mais adequada deverá ser posteriormente analisada.

Uma análise de contingência pode ser efetuada tanto no planejamento com o sistema desenergizado, ou na operação com o sistema já energizado. Qualquer que seja o caso, para que esta seja viável, é necessária uma solução rápida, em termos computacionais, e econômica, em utilização de memórias.

Os efeitos de mudanças na geração são avaliados mais facilmente que os causados pela saída ou entrada de linhas de transmissão ou transformadores, pois essas contingências mudam a configuração do sistema. Uma solução óbvia, para se ter o novo estado do sistema, é o uso das técnicas conhecidas de fluxo de carga não linear, porém são custosas e demoradas devido ao grande número de casos a serem obtidos e ao tamanho dos S.E.P. existentes. Contudo, não é necessário conseguir uma solução muito precisa para todos os estados do sistema, somente para o caso base é indispensável a determinação do fluxo de potência completo e exato. Uma solução rápida é suficiente, pois apenas uma indicação do estado de operação do sistema pós-contingência é procurada. Linearizações no modelo representativo do sistema podem ser efetuadas. Desta forma perde-se em precisão, mas o tempo de execução de cada contingência decresce.

Muitas técnicas foram desenvolvidas, a mais comumente utilizada é o método dos fatores de distribuição, no qual as mudanças nos fluxos são calculadas, usando um modelo de corrente contínua(10,11,16). Outras existem e são simplificações das soluções de fluxo de carga(19,22,28).

A técnica de análise descrita acima é determinística, isto é, seu principal objetivo é determinar cada uma das situações nas quais as restrições de operação são violadas. Estudos re

centes tem pesquisado análises estocásticas de contingências. Nestas as contingências são tratadas como eventos aleatórios e a probabilidade de sua ocorrência varia com a configuração do sistema. A segurança deste é avaliada estabelecendo-se um máximo tolerável para a probabilidade de não se satisfazer a demanda e/ou as restrições de operação. (29,32,33)

1.3 AÇÕES DE CONTROLE

Após o estudo de contingência e detectado um estado de alerta, as ações de controle possíveis são várias, tais como:

- . Mudanças na programação dos geradores;
- . Reprogramação das potências de intercâmbio entre sistemas vizinhos;
- . Disposição prévia dos cortes das cargas interruptíveis;
- . Mudanças na configuração do sistema (chaveamentos, mudanças de taps de transformadores, inclusão de reatores, etc.);
- . Mudança na lógica do controle e na filosofia de proteção.

A escolha de qualquer uma delas depende das características particulares do sistema em estudo.

Técnicas de otimização são utilizadas, principalmente no caso de reprogramação da geração, para se obter o novo despacho. O problema pode ser formulado do seguinte modo:

$$g(x,u,p) = 0 \quad (1)$$

Onde:

- g = Vetor das N equações de fluxo de potência.
- x = Vetor das variáveis de estado $x \in \mathbb{R}^n$
- u = Vetor das variáveis de controle $u \in \mathbb{R}^n$
- p = Vetor dos parâmetros ou variáveis não controladas, dimensão arbitrária.

A função objetivo $F(x,u)$.

As restrições de operação são introduzidas na forma de desigualdades:

$$h(x, u, p) \leq 0 \quad (2)$$

As contingências $p^1, p^2, p^3, \dots, p^J$ estabelecem, as seguintes equações:

$$g = (x^j, u, p^j) = 0 \quad (3)$$

onde:

$$g = \text{Vetor das equações de fluxo de carga} \\ j = 1, 2, \dots, J$$

As restrições de operação na contingência são:

$$h = (x^j, u, p^j) \leq 0 \quad (4)$$

A otimização consiste em minimizar a função $F(x,u)$ sujeita tanto às restrições de operação, bem como às da contingência.

Formalmente:

$$\min F(x,u)$$

sujeito a:

$$g(x, u, p) = 0$$

$$h(x, u, p) \leq 0$$

$$g(x^j, u, p^j) = 0$$

$$h(x^j, u, p^j) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J$$

Devido a grande complexidade e o número imenso de restrições nos sistemas usuais, simplificações são feitas e tanto a função objetivo como as restrições são linearizadas, podendo assim, serem empregadas técnicas de programação linear com excelentes resultados.

A função objetivo e as restrições de operação variam conforme o enfoque que se queira dar ao problema. Assim a $F(x,u)$ pode ser o custo de operação por hora, a corrente de estado, a potência de intercâmbio, etc. As restrições são: os limites admissíveis das correntes nas linhas de transmissão, as faixas de variação das potências dos geradores e outras.

1.4 MÉTODO INVESTIGADO

Neste trabalho foi elaborado uma análise de contingências baseada no método desenvolvido por H.E.Brown (15,21,24) o qual utiliza a matriz de impedância nodal para calcular os incrementos nas correntes das linhas de transmissão de um S.E.P., após a desconexão de algumas delas.

O método requer a montagem da matriz de impedância de barras do sistema. O tamanho e a complexidade dos sistemas usuais fazem com que o número de memórias necessárias para armazenar a matriz seja grande. Pela mesma razão o tempo de execução no computador de cada uma das contingências aumenta. Uma forma de contornar esse problema é fazer o estudo somente para as linhas relevantes. Ou seja, uma seleção prévia de todo o sistema é feita baseada na experiência do comportamento do mesmo. Assim as linhas podem ser classificadas como:

LINHAS CRÍTICAS: aquelas que tem maior possibilidade de sair de serviço.

LINHAS LIMITATIVAS: aquelas que em consequência a saída de uma linha crítica podem ficar sobrecarregadas.

Selecionando as linhas, dois tipos de contingência podem ser estudados:

SIMPLES: quando são obtidos os efeitos causados nas linhas limitativas pela saída(ou entrada) de uma linha crítica de cada vez.

MÚLTIPLA: quando são obtidos os efeitos causados pela saída(ou entrada) simultânea de todas as linhas críticas.

A análise é composta das seguintes etapas:

- 1) Obtenção da solução do fluxo de carga para o caso base, por um dos métodos não lineares conhecidos.
- 2) Montagem da matriz de impedância nodal do sistema, conservando somente as barras relativas às linhas críticas, limitativas e de geração, cujas centrais têm possibilidade de variar a potência programada; o restante do sistema pode ser descartado, após sua inclusão na matriz.(**)
- 3) Simulação da contingência e obtenção das correntes nas linhas limitativas após a retirada das linhas críticas.
- 4) Comparação das correntes obtidas nas linhas limitativas com as máximas permitidas.
- 5) Mudança na geração, no caso de haver sobrecarga.

(**) As barras de geração não têm interesse para o estudo de contingência propriamente dito. Porém são necessárias para a programação dos geradores, quando é constatada uma sobrecarga nas linhas limitativas.

O algoritmo utilizado neste trabalho difere do pesquisado por H.E.Brown, no fato que esse último obtém todos os elementos da matriz de impedância de barras pós-contingência, ao passo que no primeiro são calculados somente os que realmente são utilizados no cálculo dos incrementos de correntes. Desta forma tenta-se diminuir o tempo de execução de cada uma das configurações de contingência.

A mudança na geração proposta utiliza uma técnica de programação matemática (método do gradiente projetado) para obter o novo despacho de geração. O problema consiste em minimizar a corrente nas linhas sobrecarregadas, sem violar as correntes admissíveis das restantes.

Os itens 2), 3), 4) e 5) da sequência acima, serão desenvolvidos respectivamente nos capítulos II, III, III e IV.



C A P Í T U L O I I

ALGORÍTMO DE MONTAGEM DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA NODAL DE UM SISTEMA COM DESCARTE DOS EIXOS IRRELEVANTES

II-1 INTRODUÇÃO

Numa matriz de impedância nodal de um sistema (ZBARRA) os eixos correspondem às barras existentes. Cada elemento da diagonal é constituído pela impedância no ponto da barra correspondente, e os elementos fora da diagonal são as impedâncias de transferência entre cada barra do sistema e as demais.(*).

Uma maneira de obter a ZBARRA de um sistema é inverter a matriz de admitância nodal(YBARRA).Para um sistema constituído de muitas barras, em termos computacionais, esse cálculo seria proibitivo.

Um algoritmo de formação de ZBARRA foi desenvolvido por H.E.Brown(1) e aperfeiçoado por Reitan e Kruempel(34); neste a matriz é constituída adicionando ramo por ramo até completar todo o sistema.A cada adição uma nova ZBARRA é obtida,e seus elementos são retirados dos termos da matriz anterior.

O método requer que a primeira linha a ser incorporada contenha a referência: As seguintes devem ser escolhidas de modo que,a nova linha anexada à matriz seja ligada à alguma anteriormente incluída.

(*) Entende-se por impedância no ponto de uma barra K a relação entre a tensão da barra K para a referência,e a corrente I_K injetada na barra.Igual,portanto,à impedância equivalente entre a barra e a referência.Impedância de transferência de uma barra K para outra J é a relação da tensão obtida entre J e a referência com a corrente I_K injetada em K.Num sistema radial,equivale à impedância comum às barras J e K para a referência.

As linhas a serem incorporadas podem ser classificadas em dois tipos:

- a) Ramo ligado a um nó pertencente a parte do sistema já formado e a um novo nó (RADIAL).
- b) Ramo ligado a dois nós pertencentes ao sistema já formado (FECHA LAÇO).

A inclusão de uma linha a) ou b) modifica a matriz de maneira diversa e a obtenção dos elementos da nova ZBARRA em cada caso é diferente. (**)

II-2 ROTINA DE MONTAGEM DA MATRIZ

No estudo da contingência, somente uma parte do sistema é realmente necessária. Portanto na construção de ZBARRA interessa reter exclusivamente os eixos das linhas críticas e limitativas; as demais devem ser eliminadas, tão logo seja possível.

A partir dos dados de linhas, que entram de forma aleatória, a rotina de montagem da matriz de impedância nodal estabelece a seguinte sistemática:

- 1) Examina os dados de linhas à procura de um ramo ligado à referência. A barra parceira à referência é introduzida em uma lista de barras e a linha é incorporada à matriz.
- 2) Os dados de linhas são novamente examinados à procura das barras conectadas à primeira, todas são incorporadas e levadas à lista de barras

(**) Justificativas e desenvolvimento matemático do algoritmo podem ser encontradas em (1), (12) e (15).

na ordem em que forem processadas.

- 3) Uma vez incluídos na matriz, todos os ramos ligados ao nó em processo verifica-se ser este relevante ou não. Em caso negativo, deverá ser eliminado e o espaço ocupado por seu eixo na matriz fica disponível, sendo substituído pelo último nó incorporado à lista de barras.
- 4) Concluído o passo anterior, a barra que entra em processo será a próxima da lista de barras e os dados de linhas são novamente pesquisados na busca de todas as linhas a ela ligadas e retorna-se ao passo 2) repetindo o ciclo.

O sistema em estudo, entretanto, pode ser composto de vários subsistemas interligados apenas pela referência. Neste caso, a sistemática descrita acima deverá ser repetida tantas vezes quantos forem os subsistemas. O algoritmo monta separadamente a ZBARRA de cada um.

Deve-se ressaltar a não coincidência entre as coordenadas matriciais e a numeração das barras do sistema. Os eixos da matriz coincidem com a ordem de entrada dos nós na lista de barras.

A rotina tem por objetivo formar a matriz de impedância nodal de modo eficiente, não sendo porém ótima.

II-2.1 PESQUISA RÁPIDA NA LISTA DE LINHAS DO SISTEMA

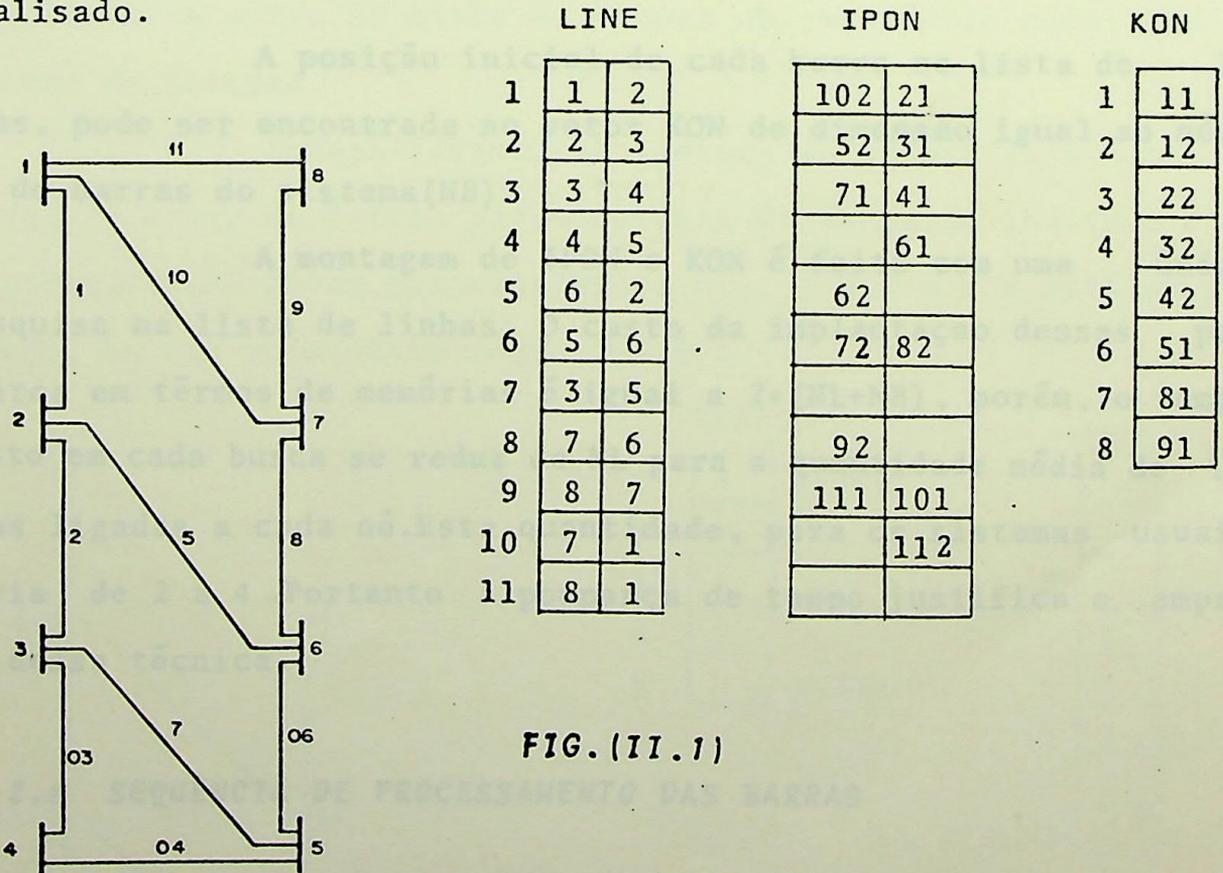
A execução da sistemática descrita no item anterior requer, para identificar todas as linhas ligadas a um mesmo

nó, uma série de pesquisas na lista de linhas, a qual denomina remos LINE.

O total de buscas a serem efetuadas em LINE é i igual ao número de ramos do sistema(NL). Assim, o tempo gasto em cada pesquisa torna-se muito importante, uma vez que um dos objetivos do programa é ter curta duração.

Uma maneira de evitar que a cada busca todas as locações de LINE sejam pesquisadas, consiste em montar uma lista de ponteiros IPON associada a LINE. A dimensão de IPON é a mesma de LINE(NL,2). Cada locação(I,J) de IPON contém, convenientemente compactada, a próxima ocorrência da barra encontrada na posição LINE(I,J). Isto é, a lista de ponteiros indica sempre a locação em LINE da próxima ocorrência da barra sob pesquisa.

Para melhor esclarecer, o sistema da Fig.(2.1) é analisado.



Através de LINE, sabe-se quais são as barras inicial e final de uma linha. A barra inicial do ramo $I=5$ corresponde a $LINE(5,1)=6$. Sua próxima ocorrência em LINE será na linha 6 como barra final, logo $I=6$ $J=2$. Compactando essa informação na forma $10 \cdot I + J$ tem-se $10 \cdot 6 + 2 = 62$; este número será guardado na posição $IPON(5,1)$. Inspeccionando a lista LINE, verifica-se que a barra final da linha $I=5$, $LINE(5,2)=2$, não mais irá aparecer. Portanto $IPON(5,2)=0$. Deste modo pode-se obter a próxima ocorrência em LINE de uma barra qualquer do sistema com as seguintes declarações:

$$K = IPON(I, J)$$
$$JB = LINE(K/10, MOD(K, 10))$$

Onde:

$$JB = \text{BARRA PROCURADA}$$
$$MOD = \text{RESTO DA DIVISÃO } K/10$$

A posição inicial de cada barra na lista de linhas, pode ser encontrada no vetor KON de dimensão igual ao número de barras do sistema (NB).

A montagem de IPON e KON é feita com uma única pesquisa na lista de linhas. O custo da implantação desses pontos em termos de memórias é igual a $2 \cdot (NL + NB)$, porém, o tempo gasto em cada busca se reduz de NL para a quantidade média de linhas ligadas a cada nó. Esta quantidade, para os sistemas usuais varia de 2 a 4. Portanto a poupança de tempo justifica o emprego dessa técnica.

II-2.2 SEQUÊNCIA DE PROCESSAMENTO DAS BARRAS

A medida que as linhas conectadas a uma barra são incluídas em ZBARRA, os nós parceiros são armazenados em uma lis

ta de barras, denominada KEIXO, segundo a ordem que aparecem no processo.

O primeiro nó a ser incorporado na lista KEIXO é o parceiro da referência. KEIXO possui dois ponteiros associados e o primeiro IPR (ponteiro do processo) indica a locação do nó em processamento. O segundo, INK, aponta a próxima locação livre em KEIXO e é incrementado assim que um novo nó é acrescentado à lista de barras.

Após serem incorporadas à matriz todas as linhas ligadas a um mesmo nó, se este estiver na lista de nós relevantes (NREL), IPR é incrementado. Caso contrário, IPR permanece na mesma posição, mas a barra em processo é substituída pela última incorporada à lista KEIXO, devendo ser processada.

Pelo que foi descrito acima, KEIXO indica a correspondência entre os eixos da matriz de impedância nodal com as barras do sistema.

Exemplificando, o sistema da figura(2.1) tem a seguinte lista de barras para o estágio de formação indicado na figura(2.2). Já foram processados os nós 2,6,3 e o 4 está em processo. Os nós relevantes são: 4,5,6 e 7

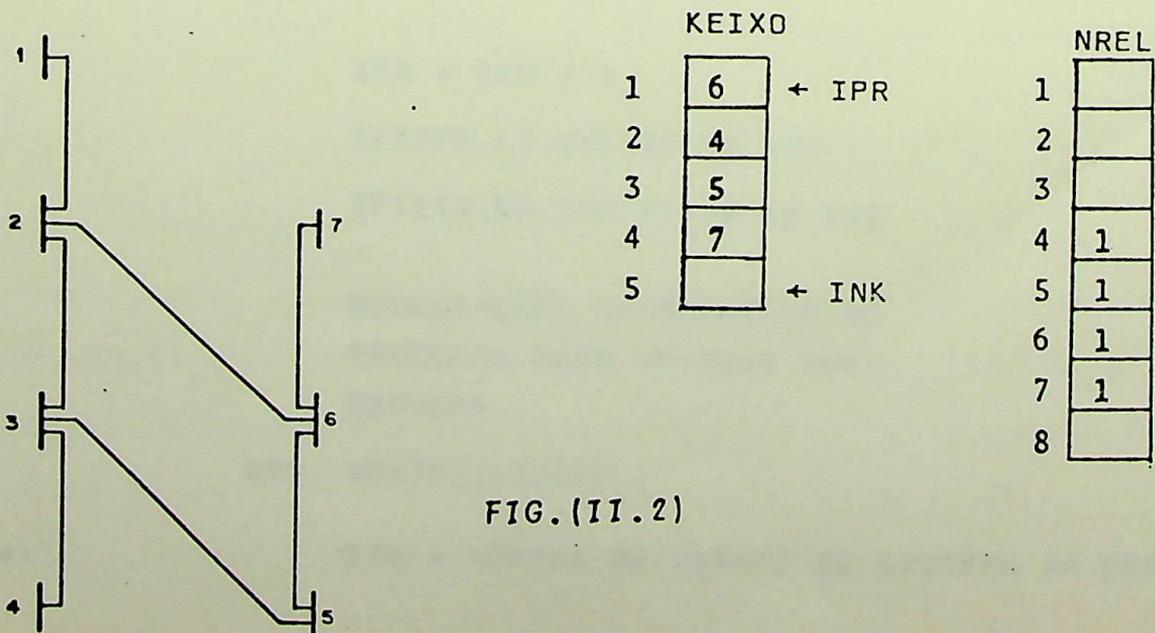
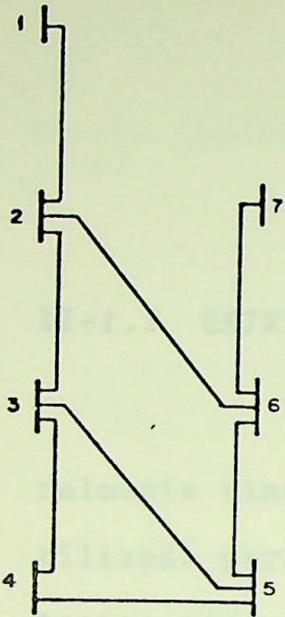


FIG. (II.2)

Após o nó 4 ser processados tem-se:



KEIXO

6
4
5
7

← IPR

← INK

FIG. (11.3)

No caso de existirem vários subsistemas, as ZBARAS de cada um são formadas separadamente. O término da montagem de cada uma em particular é detectado quando os ponteiros IPR e INK se igualam.

As declarações necessárias para continuar ou terminar o algoritmo são as seguintes:

```
500 J = KEIXO(IPR)
```

```
ITB = ITB + 1
```

DECLARAÇÕES REFERENTES

AO PROCESSO DO NÓ J

```
IPR = IPR + 1
```

```
IF(IPR.LT.INK)GØ TØ 500
```

```
IF(ITB.EQ.(NB-1))GØ TØ 600
```

DECLARAÇÕES DE REINÍCIO DO
PROCESSO PARA UM NOVO SUB-
SISTEMA

```
600 WRITE(1,300)Z
```

Onde:

ITB = NÚMERO DE BARRAS DO SISTEMA JÁ PROCES

SADAS.

NB= NÚMERO TOTAL DE BARRAS DO SISTEMA

J = NÓ EM PROCESSO

II-2.3 ESTRUTURA DE ARMAZÉNAMENTO DA MATRIZ

Uma matriz de impedância nodal de um sistema é geralmente simétrica, complexa e cheia. A quantidade de memórias utilizadas para armazenar uma matriz completa é igual a NB^2 . Entretanto, aproveitando a simetria, somente precisa ser conservado o triângulo inferior da matriz. Com isso a quantidade de memórias necessárias se reduz a $(NB^2+NB)/2$.

Um vetor complexo Z foi utilizado para armazenar ZBARRA, fila por fila. Assim para encontrar a locação em Z do elemento de coordenadas matriciais JF, JC usa-se:

$$N = JF (JF-1) + JC \quad (1)$$

Onde:

JF = a fila correspondente ao nó J

JC = a coluna correspondente ao nó JJ

No caso de $JF < JC$ basta inverter os índices e a fórmula (1) é válida, uma vez que $ZB(JF,JC) = ZB(JC,JF)$, onde:

$ZB(JF,JC)$ = elemento de ZBARRA de coordenadas JF e JC.

Quando existem vários subsistemas, o número de locações ocupadas pelos subsistemas já processados deve ser retido. Para tanto, existe um vetor IBASE, de dimensão igual ao número de subsistemas, onde são guardadas as posições no vetor Z dos primeiros elementos das matrizes correspondentes à cada subsistema. Isto é:

$$N=IBASE(IS) + JF(JF-1)/2 + JC-1 \quad (2)$$

Exemplificando, a locação do elemento ZB(3,1) da matriz ZBARRA do subsistema IS=3 é igual a :

$$N = \text{IBASE}(3) + 3(3-1)/2 + 1-1 = 46$$

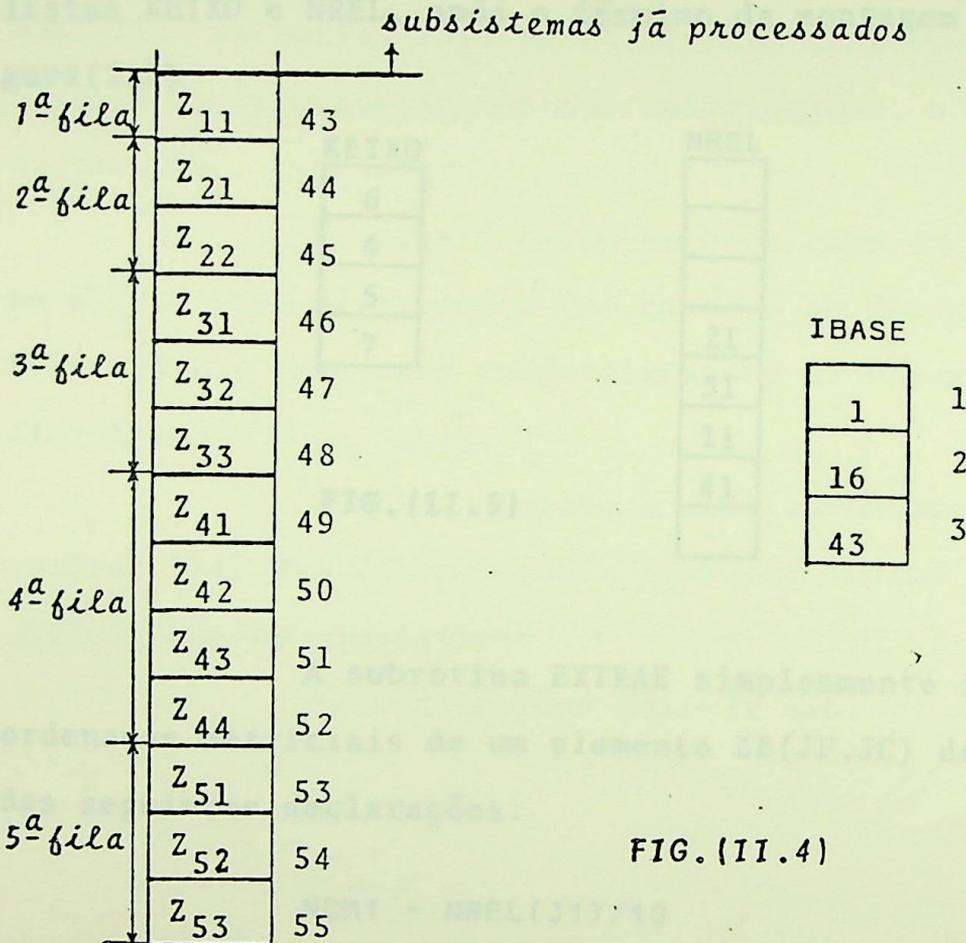


FIG. (II.4)

Uma vez montada e armazenada a matriz de impedância nodal do sistema completo, isto é, com todas as ZBARRA de cada subsistema em particular, para extrair informações de determinada barra (no caso do estudo de contingência) utiliza-se uma subrotina denominada EXTRAE.

A correspondência entre os eixos da matriz e as barras do sistema é feita através de KEIXO. Entretanto, é necessário saber quais as barras pertencentes a cada um dos subsistemas. Para isso, utiliza-se a lista NREL, após o término do proces

so completo de um nó relevante. Na sua posição correspondente em NREL é guardada, na forma compactada, o seu respectivo eixo da submatriz.

Para melhor esclarecer, são indicadas abaixo as listas KEIXO e NREL, após o término da montagem do sistema da Figura(2.1)

KEIXO	NREL
6	
4	
5	
7	21
	31
	11
	41

FIG. (11.5)

A subrotina EXTRAE simplesmente identifica as coordenadas matriciais de um elemento ZB(JF,JC) da matriz através das seguintes declarações:

```
NCM1 = NREL(J1)/10
IS1 = MOD (NREL (J1),10)
NCM2 = NREL(J2)/10
IS2 = MOD (NREL (J2),10)
```

Onde: J1 = Nó correspondente ao eixo JF de ZBARRA
J2 = Nó correspondente ao eixo JC de ZBARRA

A locação do elemento ZB(JF,JC) no vetor Z é obtida, como descrito acima, através de (1), (2)

Os eixos JF,JC não podem pertencer a dois subsistemas diferentes, portanto, IS1=IS2. Isso pode ser verificado usando uma declaração IF.

II-3 SUBROTINAS

II-3.1 SELEÇÃO DAS BARRAS RELEVANTES

Esta subrotina, a partir dos dados do sistema, identifica as barras relevantes, fazendo constar no vetor NREL, na posição correspondente aos nós selecionados, o número um, nos restantes zero.

A identificação de cada tipo de ramo é fornecida em NTIP e lida diretamente dos cartões de dados. Conforme NTIP seja 0,1,2, o ramo será respectivamente irrelevante, crítico ou limitativo. (*)

Simultaneamente à NREL, são montados outros dois vetores LIKI(NLK,2), contendo a lista de linhas críticas e LILI(NLL,2), com as limitativas.

As declarações básicas são:

K = 1

L = 1

50 READ(12,100) JE, JR, NTIP

IF(NTIP.EQ.0) GO TO 50

NESK (JE) = 1

NESK (JR) = 1

IF(NTIP.EQ.2) GO TO 55

LIKI(K,1) = JE

LIKI(K,2) = JR

K = K + 1

GO TO 50

(*) Caso, posteriormente ao estudo de contingência, houver reprogramação da geração, as barras cujas centrais geradoras forem passíveis de mudança devem ser incluídas em NREL.

55 LILI(L,1) = JE

LILI(L,2) = JR

L = L + 1

GØ TØ 50

Onde:

JE = Nó Inicial do Ramo I

JR = Nó Final do Ramo I

NLK = Número Total de Linhas Críticas

NLL = Número Total de Linhas Limitativas



II-3.2 SUBROTINA DE COSTURA (COST)

A rotina COST emprega duas declarações DO, uma externa que seleciona as linhas sucessivamente e uma interna que permite a análise da barra inicial e final de cada linha. Emprega-se também um vetor LAST de dimensão igual a NB, no qual será armazenado de forma compacta a posição em LINE da última ocorrência das barras do sistema. Assim, ao iniciar o processo para uma linha L, LAST(L) contém as coordenadas do último aparecimento, da barra L. Se uma barra do sistema, ainda não apareceu no processo, sua correspondente posição em LAST deverá conter um zero.

A determinação do primeiro aparecimento de uma barra $L = \text{LINE}(I, J)$ é feita através de uma declaração IF. No caso afirmativo a informação I, J será compactada e guardada em KON(L). Caso contrário, esta deverá ser armazenada em IPON, na localização correspondente ao último aparecimento de L. O desenvolvimento da subrotina é simples e baseado nas seguintes declarações:

DO 10 J = 1, NL

DO 15 J = 1, 2

```
TRADUC  
N = LINE(I,J)  
M = 10* I+ J  
IF (KØN(N).NE.0) GO TO 17  
KØN(N) = M  
GO TO 15  
17 K = LAST(N)  
IPØN(K/10,MOD(K,10))=M  
15 LAST(N) =K  
10 CONTINUE
```

II-3.3 SUBROTINAS DE INCORPORAÇÃO DE LINHAS

A incorporação, na matriz de impedância nodal de um sistema, das linhas ligadas a uma mesma barra exige procedimentos diferentes de acordo com os tipos de ramo. Assim a subrotina utilizada para a inclusão de uma linha radial é a RADIA e para uma fecha-laço, a FECHA.

As subrotinas sofrem alterações quando a barra parceira é a referência, pois este nó não está incluso na matriz. Portanto outras duas subrotinas RAREF e FEREF são empregadas nestes casos.

Os eixos de ZBARRA não correspondem à numeração das barras do sistema, Portanto para retirar ou incluir na matriz um elemento é necessário conhecer a correspondência entre a barra J e o seu respectivo eixo em ZBARRA(J1), além da posição N ocupada pelo mesmo em Z. Assim, foi desenvolvido um subprograma 'TRADUC, para fazer esta correspondência e fornecer a posição de qualquer elemento da matriz em Z.

Todas as subrotinas de incorporação fazem uso de

TRADUC.

Em TRADUC é feita uma pesquisa em KEIXO para encontrar os eixos J1 e J2 correspondentes aos nós J e JJ, conforme indicado nas declarações transcritas abaixo:

```
J1 = 0
J2 = 0
DO K = 1, INK
IF(KEIXO(K).EQ.J)J1 = K
IF(KEIXO(K).EQ.JJ)J2= K
```

A posição ocupada no vetor Z de um elemento de ZBARRA é obtida de acordo com o que foi descrito no item II-2.3.

II-3.3.1 INCORPORAÇÃO DE UMA LINHA RADIAL

Esta subrotina, denominada RADIA, não altera a parte já existente de ZBARRA, somente acrescenta um novo eixo, correspondente ao nó em incorporação. Este eixo, com exceção do elemento diagonal, é cópia do eixo relativo à barra em processo. Para obtenção do elemento da diagonal, basta acrescentar à impedância própria da barra, já incluída na matriz, a impedância da linha em incorporação.

II-3.3.2 INCORPORAÇÃO DE UMA LINHA RADIAL LIGADA À REFERÊNCIA

A subrotina RAREF é empregada para a primeira linha ligada à referência de cada subsistema; as demais serão do tipo fecha-laço.

Utilizando um indicador IPP, inicialmente zero e incrementado após o uso de RAREF, é feita a escolha da rotina apropriada. São necessárias as seguintes declarações:

```
IF(JJ.EQ.JR) GO TO 1
```

```
  . . .  
  . . .  
  . . .  
  . . .
```

```
1IF(IPP.EQ.1) GO TO 2
```

```
  CALL RAREF
```

```
  . . .  
  . . .
```

```
2 CALL FEREF
```

Com a adição de uma linha radial ligada à referência, a matriz aumenta de um eixo, no qual somente o elemento da diagonal é diferente de zero e que vale:

```
ZB(J2,J2) = ZLL(I)
```

Onde: J2 = Eixo Correspondente a Barra JJ

ZLL(I) = Impedância da Linha I

II-3.3.3 INCORPORAÇÃO DE UMA LINHA FECHA-LAÇO

A inclusão de uma linha do tipo fecha-laço não acrescenta ao sistema nenhuma barra; também não introduz um novo eixo em ZBARRA. Para representar os efeitos causados no sistema pela adição deste tipo de linha, um eixo fictício é criado e posteriormente eliminado pelo método de Kron(1).

Os elementos fora da diagonal deste eixo são obtidos subtraindo os eixos correspondentes às barras inicial e final da linha. O termo diagonal é igual a:

```
ZB(JEF,JEF)=ZB(J1,J1)+ZB(J2,J2)-2*ZB(J1,J2)+ZLL(I)
```

Onde: JEF = Eixo Fictício

J1 = Eixo Correspondente às Barras

J2 = Eixo Correspondente à Barra JJ

I = Linha de Incorporação

ZB(JF,JC) = Elemento da Matriz de Impedância Nodal
de Coordenadas Matriciais JF,JC.

A eliminação do eixo fictício é feita do seguinte modo:

DO 20 JF = 1, INK-1

DO 20 JC = 1, JF

20 ZB(JF,JC) = ZB(JF,JC) - ZB(JF,JEF) * ZB(JEF,JC) / ZB(JEF,
JEF)

II-3.3.4 INCORPORAÇÃO DE UMA LINHA FECHA-LAÇO COM A BARRA DE REFERÊNCIA

Esta subrotina não difere muito da anterior. Uma das barras sendo a referência, os elementos de seu eixo não existem; portanto, o eixo fictício é igual ao da barra em processo e o termo da diagonal se reduz a:

ZB(JEF,JEF) = ZB(J1,J1) + ZLL(I)

II-3.4 SUBROTINA DE ELIMINAÇÃO DOS EIXOS IRRELEVANTES

ELIMIN é utilizada quando o eixo processado não é um dos pré-selecionados. Esta subrotina faz a eliminação do nó J, substituindo os valores armazenados no vetor Z, nas posições correspondentes ao seu eixo J1, pelos valores dos componentes do último nó incorporado à ZBARRA.

A substituição é feita da seguinte maneira:

- 1) Os elementos $JC < J1$ serão armazenados nas posições correspondentes a fila $J1$. Isto é, $ZB(JN,JC)$, irá para a locação de $ZB(J1,JC)$.
- 2) O elemento da diagonal $ZB(JN,JN)$ vai para o lugar ocupado por $ZB(J1,J1)$.
- 3) Os elementos $JC > J1$ irão para as locações da coluna $J1$; isto é, $ZB(JN,JC)$ será armazenado na posição de $ZB(JC,J1)$.

```
JN = Último eixo de ZBARRA
JC = Coluna da Matriz ZBARRA
NLL=(INK-1)*(INK-2)/2 + IBASE(IS)-1
NJJ=J1*(J1-1)/2 + IBASE(IS)-1
DO15 I = 1,INK-2
IF(I-J1)10,20,30
10 I1 = NLL + I
   I2 = NJJ + I
   GO TO 40
20 I1 =NLL + INK-1
   I2 =NJJ + I
   GO TO 40
30 I2 =I*(I-1)/2 +J1+IBASE(IS)-1
   I1 =NJJ + I
   GO TO 40
40 Z(I2)=Z(I1)
   Z(I1)=0
   KEIXO(J1) =KEIXO(INK-1)
   KEIXO(INK-1)=0
   INK = INK-1
```

CAPÍTULO III

ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA

III-1 NOMENCLATURA

- $p - q, r - s, u - v$ - Linhas críticas
- K - Vetor linhas críticas
- $a - b, c - d, f - g$ - Linhas limitativas
- L - Vetor de linhas limitativas
- α - Vetor de barras emissoras das linhas críticas
- β - Vetor de barras receptoras das linhas críticas
- γ - Vetor das barras das linhas críticas = $[\alpha, \beta]^t$
- v - Vetor de barras emissoras das linhas limitativas
- σ - Vetor de barras receptoras das linhas limitativas
- θ - Vetor das barras das linhas limitativas = $[v, \sigma]^t$
- Z - Matriz de impedância nodal do sistema pré-contingência
- $Z_{\alpha\beta}$ - Partição de Z onde as filas são as barras do vetor α e as colunas as do vetor β
- \bar{Z} - Matriz de impedância nodal do sistema pós-contingência
- ZL - Matriz das impedâncias de linhas do sistema.

- Z_{ab}^1 - Impedância da linha $i-j$
- Z_{pq} - Elemento da matriz de coordenadas $p.q.$
- E - Vetor das tensões de barras de coordenadas $p.q$ pré-contingência obtidas através do fluxo de potência não-linear.
- \bar{E} - Vetor das tensões de barras do sistema pós-contingência
- I - Vetor das correntes de barra do sistema pré-contingência
- \bar{I} - Vetor das correntes de barras do sistema pós-contingência
- IL - Vetor das correntes de linha do sistema pré-contingência
- $\bar{I}L$ - Vetor das correntes de linhas do sistema pós-contingência.

Para melhor esclarecer a estrutura das equações matriciais desenvolvidas neste capítulo, foi incluído o apêndice I, no qual os operadores de seleção empregados são definidos e sua utilização explicada.

III-2 INTRODUÇÃO

A essência do método de análise de contingências desenvolvido neste trabalho, consiste em obter um valor aproximado das correntes pós-contingência nas linhas limitativas, fazendo uma aproximação do modelo representativo do sistema e calculando a variação dessas correntes, ΔIL , produzidas pela retirada das linhas críticas. O valor das correntes de linhas pós-contingência $\bar{I}L$ é encontrado adicionando ΔIL às correntes IL obtidas na solução não linear do fluxo de carga para o caso base.

$$\bar{I}_{L_L} = I_{L_L} + \Delta I_{L_L} \quad (1)$$

O estado pré-contingência é simulado com injeções de correntes nas barras emisoras de cada linha crítica. Essas correntes devem necessariamente produzir as mesmas quedas de tensões nas linhas críticas existentes no caso base. Nas demais barras do sistema não é injetada corrente alguma. Entretanto, aquelas, fluindo pelas linhas do sistema, produzem nas linhas limitativas quedas de tensão diversas das encontradas no caso base e que podem ser calculadas usando-se as seguintes equações nodais:

$$E'_v - E'_\sigma = [Z_{v\alpha} - Z_{\sigma\alpha}] [I_\alpha] \quad (2)$$

A simulação da contingência é feita retirando-se (ou adicionando-se) do sistema as linhas críticas. A nova matriz de impedância nodal do sistema é obtida e assim as novas quedas de tensão nas linhas limitativas valem:

$$\bar{E}'_v - \bar{E}'_\sigma = [\bar{Z}_{v\alpha} - \bar{Z}_{\sigma\alpha}] [I_\alpha] \quad (3)$$

$$\Delta(E'_v - E'_\sigma) = (\bar{E}'_v - \bar{E}'_\sigma) - (E'_v - E'_\sigma) \quad (4)$$

Onde I_α = Vetor de correntes de barra injetado nas barras emisoras das linhas críticas.

A variação das correntes em uma linha limitativa a-b pode ser encontrada da forma indicada abaixo:

$$\Delta I_{L_{ab}} = \frac{\Delta(E'_a - E'_b)}{z_{lab}} \quad (5)$$

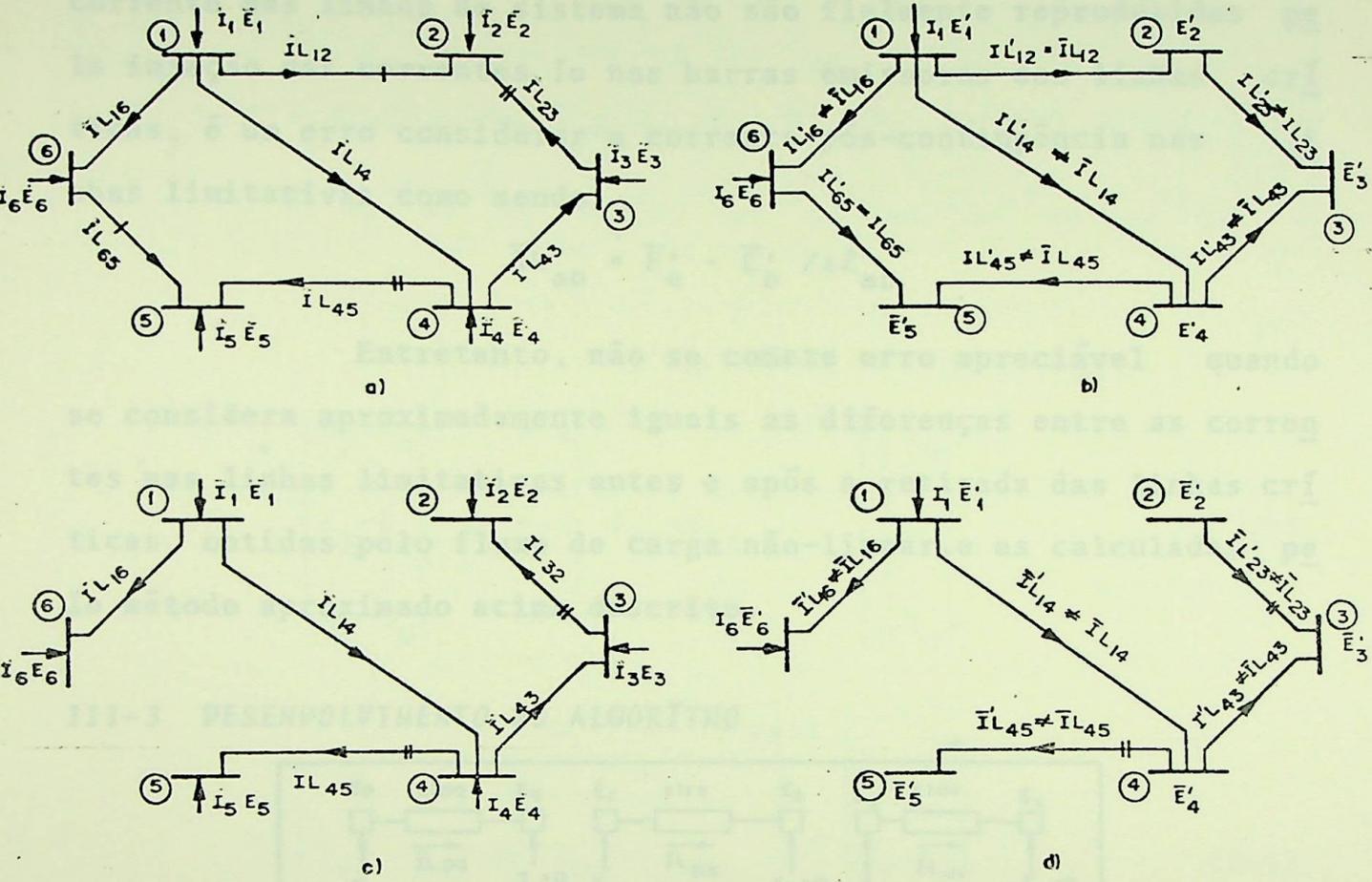


FIG. (III-1) a) e c) Fluxo de Potência completo respectivamente do caso base e do estado pós-contingência. b) e d) Estado permanente e pós-contingência simulados pela injeção das correntes de barras I_1 e I_6 .

$$\Delta E_{23} = (\bar{E}_2 - \bar{E}_3) - (E_2 - E_3)$$

$$\Delta E'_{23} = (\bar{E}'_2 - \bar{E}'_3) - (E'_2 - E'_3)$$

$$\Delta E_{45} = (\bar{E}_4 - \bar{E}_5) - (E_4 - E_5)$$

$$\Delta E'_{45} = (\bar{E}'_4 - \bar{E}'_5) - (E'_4 - E'_5)$$

$$\Delta IL_{23} = \Delta E_{23} / z l_{23}$$

$$\Delta IL'_{23} = \Delta E'_{23} / z l_{23}$$

$$\Delta IL_{45} = \Delta E_{45} / z l_{45}$$

$$\Delta IL'_{45} = \Delta E'_{45} / z l_{45}$$

$$\bar{IL}_{23} = IL_{23} + \Delta IL_{45}$$

$$\bar{I}'_{L23} = IL_{23} + \Delta IL_{23} = \bar{IL}_{23}$$

$$\bar{IL}_{45} = IL_{45} + \Delta IL_{45}$$

$$\bar{I}'_{L45} = IL_{45} + \Delta IL_{45} = \bar{IL}_{45}$$

Uma vez que as tensões nas barras e os fluxos de corrente nas linhas do sistema não são fielmente reproduzidas pela injeção das correntes I_α nas barras emissoras das linhas críticas, é um erro considerar a corrente pós-contingência nas linhas limitativas como sendo:

$$\bar{I}_{L_{ab}} = \bar{E}'_a - \bar{E}'_b / z\ell_{ab}$$

Entretanto, não se comete erro apreciável quando se considera aproximadamente iguais as diferenças entre as correntes nas linhas limitativas antes e após a retirada das linhas críticas, obtidas pelo fluxo de carga não-linear, e as calculadas pelo método aproximado acima descrito.

III-3 DESENVOLVIMENTO DO ALGORÍTMO

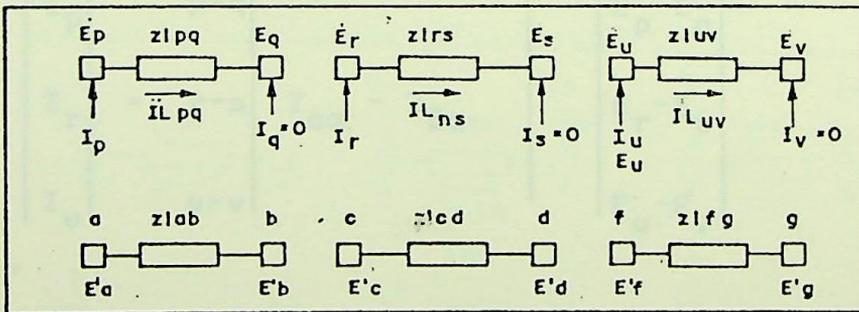


FIG: (III-2)

Supondo que no sistema da figura(III-2) será investigada uma contingência múltipla. Os vetores E , das tensões nas barras, e IL , das correntes de linha, são obtidos por um método não-linear de fluxo de carga(*) e a matriz Z é montada. Através das equações a seguir, pode-se determinar as correntes que devem simu

(*) Com a finalidade de economizar memórias é suficiente guardar as tensões das barras das linhas críticas e limitativas e das gerações, onde existe a possibilidade de variação na potência. As correntes de linhas necessárias são as das linhas críticas e limitativas; as restantes podem ser dispensadas.

lar o despacho pré-contingência.

$$\begin{bmatrix} E_p - E'_q \\ E_r - E'_s \\ E_u - E'_v \end{bmatrix} = \begin{matrix} p-q \\ r-s \\ u-v \end{matrix} \begin{bmatrix} Z_{pp} & -Z_{qp} & Z_{pq} & -Z_{qq} & Z_{pr} & -Z_{qr} & Z_{ps} & -Z_{qs} & Z_{pu} & -Z_{qu} & Z_{pv} & -Z_{qv} \\ Z_{rp} & -Z_{sp} & Z_{rq} & -Z_{sq} & Z_{rr} & -Z_{sr} & Z_{rs} & -Z_{ss} & Z_{ru} & -Z_{su} & Z_{rv} & -Z_{sv} \\ Z_{up} & -Z_{vp} & Z_{uq} & -Z_{vq} & Z_{ur} & -Z_{vr} & Z_{us} & -Z_{vs} & Z_{uu} & -Z_{vu} & Z_{uv} & -Z_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ 0 \\ I_r \\ 0 \\ I_u \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} E_p - E'_q \\ E_r - E'_s \\ E_u - E'_v \end{bmatrix} = \begin{matrix} p-q \\ r-s \\ u-v \end{matrix} \begin{bmatrix} Z_{\alpha\alpha} & -Z_{\beta\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_r \\ I_u \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_r \\ I_u \end{bmatrix} = \begin{matrix} p-q \\ r-s \\ u-v \end{matrix} \begin{bmatrix} Z_{\alpha\alpha} & -Z_{\beta\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_p - E'_q \\ E_r - E'_s \\ E_u - E'_v \end{bmatrix} \quad (8.a)$$

$$I_\alpha = [Z_{\alpha\alpha} \quad -Z_{\beta\alpha}]^{-1} [E_\alpha - E_\beta] \quad (8.b)$$

As quedas de tensões $E'_a - E'_b$, $E'_c - E'_d$, $E'_f - E'_g$ produzidas pela injeção do vetor de correntes I_α valem:

$$\begin{bmatrix} E'_a - E'_b \\ E'_c - E'_d \\ E'_f - E'_g \end{bmatrix} = \begin{matrix} a-b \\ c-d \\ f-g \end{matrix} \begin{bmatrix} Z_{ap} & -Z_{bp} & Z_{ar} & -Z_{br} & Z_{au} & -Z_{bu} \\ Z_{cp} & -Z_{dp} & Z_{cr} & -Z_{dr} & Z_{cu} & -Z_{du} \\ Z_{fp} & -Z_{gp} & Z_{fr} & -Z_{gr} & Z_{fu} & -Z_{gu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_r \\ I_u \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[E'_v - E'_\sigma] = [Z_{v\alpha} \quad -Z_{\sigma\alpha}] [I_\alpha] \quad (10)$$

A simulação da saída das linhas críticas é feita adicionando-se em paralelo a p-q, r-s e u-v um ramo de impedância igual a existente porém negativa.

Utilizando o algoritmo de incorporação para linhas fecho-laço, os ramos são acrescentados um de cada vez, para a geração da matriz de impedância nodal modificada.

Esse método é trabalhoso e em termos computacionais demorado. Uma solução melhor é incorporar à matriz todos os ramos em uma única operação. Isto pode ser feito obtendo-se a matriz ΔZ a qual contém todos os elementos modificantes de Z .

Dessa forma:

$$\bar{Z} = Z - \Delta Z$$

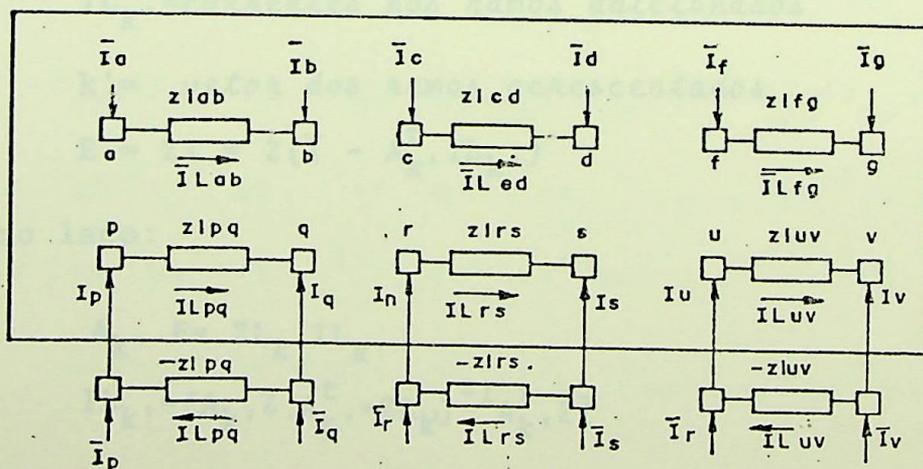


FIG. (III.3)

Analisando as correntes de barras do sistema da figura(III-3) tem-se:

$$\bar{I} = \bar{A}^t IL = A^t IL + A_{k' k'}^t IL = I + A_{k' k'}^t IL_{k'} \quad (11)$$

$$\bar{I}L = \begin{vmatrix} IL \\ \text{-----} \\ 0 \end{vmatrix} \quad IL = \begin{vmatrix} IL_{ab} \\ IL_{cd} \\ IL_{fg} \\ IL_{pq} \\ IL_{rs} \\ IL_{uv} \end{vmatrix} \quad IL_{k'} = \begin{vmatrix} IL_{pq} \\ IL_{rs} \\ IL_{uv} \end{vmatrix}$$

- Onde:
- A = matriz de incidência do sistema antes da adição
 - \bar{A} = matriz de incidência do sistema após adição
 - $A_{k'}$ = partição da matriz de incidência correspondente aos elementos adicionados
 - $IL_{k'}$ = correntes nos ramos adicionados
 - k' = vetor dos ramos acrescentados
 - $E = ZI = Z(\bar{I} - A_{k'}^t, IL_{k'})$ (12)

mas por outro lado:

$$A_{k'} \cdot E = ZL_{k'} \cdot IL_{k'}$$

$$IL_{k'} = (A_{k'} \cdot Z \cdot A_{k'}^t + ZL_{k'})^{-1} A_{k'}^t \cdot Z\bar{I} \quad (13)$$

Substituindo (13) em (12)

$$Z\bar{I} - ZA_{k'}^t \cdot (A_{k'} \cdot ZA_{k'}^t + ZL_{k'})^{-1} A_{k'}^t \cdot Z\bar{I} =$$

$$= (Z - ZA_{k'}^t \cdot (A_{k'} \cdot ZA_{k'}^t + ZL_{k'})^{-1} A_{k'}^t \cdot Z)\bar{I} \quad (14.a)$$

$$= (Z - \Delta Z)\bar{I} = \bar{Z}\bar{I} \quad (14.b)$$

A matriz $(A_{k'} \cdot ZA_{k'}^t + ZL_{k'})$ não pode ser singular, pois neste caso a inversa inexistente. Isto aparece quando \bar{Z} também for

singular. Nos sistemas usuais isso ocorre quando uma contingência isola alguma barra do restante do sistema. Neste caso, a análise de contingência deverá ser feita por um método diferente. Desenvolvendo as expressões(14) para o sistema da figura(III-3):

$$Z A_k^t = \begin{vmatrix} Z_{1p} - Z_{1q} & Z_{1r} - Z_{1s} & Z_{1u} - Z_{1v} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{pp} - Z_{pq} & Z_{pr} - Z_{ps} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{vp} - Z_{vq} & Z_{vr} - Z_{vs} & Z_{uu} - Z_{uv} \\ & & Z_{vu} - Z_{vv} \end{vmatrix} \quad (15)$$

$$A_{k,Z} = \begin{vmatrix} Z_{p1} - Z_{q1} \dots\dots\dots Z_{pp} - Z_{pq} \dots\dots\dots Z_{pv} - Z_{qv} \\ Z_{r1} - Z_{s1} \dots\dots\dots Z_{rr} - Z_{rs} \dots\dots\dots Z_{rv} - Z_{sv} \\ Z_{u1} - Z_{v1} \dots\dots\dots Z_{uv} - Z_{vv} \end{vmatrix} \quad (16)$$

$$A_{k,Z} A_k^t = \begin{vmatrix} Z_{pp} + Z_{qq} - 2Z_{pq} & Z_{pr} - Z_{ps} - Z_{qr} + Z_{qs} & Z_{pu} - Z_{ps} - Z_{qu} + Z_{qv} \\ Z_{rp} - Z_{sp} - Z_{rq} + Z_{sq} & Z_{rr} + Z_{ss} - 2Z_{rs} & Z_{ru} - Z_{rv} - Z_{su} + Z_{sv} \\ Z_{up} - Z_{sp} - Z_{uq} + Z_{vq} & Z_{ur} - Z_{vr} - Z_{us} + Z_{vs} & Z_{uu} + Z_{vv} - 2Z_{uv} \end{vmatrix} \quad (17)$$

Sabendo-se que: $Z_{pr} = Z_{rp}$, $Z_{ps} = Z_{sq}$, $Z_{qr} = Z_{rq}$, $Z_{sq} = Z_{qs}$

$$Z A_k^t (Z A_k^t + zL)^{-1} = \begin{vmatrix} Z_{pp} + Z_{qq} - 2Z_{pq} + zL_{pq} & Z_{pr} - Z_{ps} - Z_{qr} + Z_{qs} & Z_{pu} - Z_{ps} - Z_{qu} + Z_{qv} \\ Z_{pr} - Z_{ps} - Z_{qr} + Z_{qs} & Z_{rr} + Z_{ss} - 2Z_{rs} + zL_{rs} & Z_{ru} - Z_{rv} + Z_{su} + Z_{sv} \\ Z_{pu} - Z_{ps} - Z_{qu} + Z_{qv} & Z_{ru} - Z_{rv} + Z_{su} + Z_{sv} & Z_{uu} + Z_{vv} - 2Z_{uv} + zL_{uv} \end{vmatrix}^{-1} \quad (18)$$

Para a contingência simples tem-se:

ZA_k^t = Vetor-coluna igual a diferença entre as co
lunas p e q da matriz Z BARRA

A_k, Z = Vetor acima transposto

$$(A_k, ZA_k^t + zL)^{-1} = (Z_{pp} + Z_{qq} - 2Z_{pq} + zL_{pq})^{-1}$$

Quando as linhas críticas são removidas, as corren
tes que fluem por elas irão circular por outros caminhos. Is
to produzirá quedas de tensão diferentes nas linhas limitativas. Es
tas, podem ser encontradas através das equações nodais abaixo.

$$\begin{bmatrix} \bar{E}'_a - \bar{E}'_b \\ \bar{E}'_c - \bar{E}'_d \\ \bar{E}'_f - \bar{E}'_g \end{bmatrix} = \begin{matrix} p & r & u \\ a-b & c-d & f-g \end{matrix} \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ap} - \bar{Z}_{bp} & \bar{Z}_{ar} - \bar{Z}_{br} & Z_{au} - Z_{bu} \\ \bar{Z}_{cp} - \bar{Z}_{dp} & \bar{Z}_{cr} - \bar{Z}_{dr} & Z_{cu} - Z_{du} \\ \bar{Z}_{fp} - \bar{Z}_{gp} & \bar{Z}_{fr} - \bar{Z}_{gr} & Z_{fu} - Z_{gu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_r \\ I_u \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[\bar{E}'_v - \bar{E}'_\sigma] = [Z_{v\alpha} - Z_{\sigma\alpha}] [I_\alpha] \quad (20)$$

$$\Delta(E'_v - E'_\sigma) = (\bar{E}'_v - \bar{E}'_\sigma) - (E'_v - E'_\sigma) = [(Z_{v\alpha} - Z_{\sigma\alpha}) - (\bar{Z}_{v\alpha} - \bar{Z}_{\sigma\alpha})] [I_\alpha]$$

$$\Delta(E'_v - E'_\sigma) = -[\Delta Z_{v\alpha} - \Delta Z_{\sigma\alpha}] [I_\alpha] \quad (21)$$

Substituindo (14.e) em (21)

$$\Delta(E'_v - E'_\sigma) = -[(ZA_k, (A_k, ZA_k^t + zL_k)^{-1} A_k^t, Z)]_{v\alpha} - [(ZA_k, (A_k, ZA_k^t - zL_k)^{-1} A_k^t, Z)]_{\sigma\alpha} [I_\alpha] \quad (22)$$

Pela equação (22) as diferenças das quedas de ten
são; nas linhas limitativas podem ser obtidas diretamente sem ne-
cessidade de montar a matriz de impedância nodal do sistema pós-
-contingência.

No caso de contingência simples cada parcela de

(22) se reduz a:

$$\Delta Z_{vp} = \frac{\begin{array}{l} z_{ap} - z_{aq} \\ z_{cp} - z_{cq} \\ z_{fp} - z_{fq} \end{array} \left| \begin{array}{l} z_{pp} - z_{qp} \\ \\ \end{array} \right.}{z_{pp} + z_{qq} - 2z_{pq} + z\ell_{pq}}$$

$$\Delta Z_{\sigma p} = \frac{\begin{array}{l} z_{bp} - z_{bq} \\ z_{dp} - z_{dq} \\ z_{gp} - z_{pq} \end{array} \left| \begin{array}{l} z_{bp} - z_{qp} \\ \\ \end{array} \right.}{z_{pp} + z_{qq} - 2z_{pq} + z\ell_{pq}}$$

Para a contingência múltipla indicada na Figura(III-3) as expressões de ΔZ_{va} e $\Delta Z_{\sigma a}$ são as seguintes:

$$\Delta Z_{\nu\alpha} = \begin{array}{c|c|c|c} Z_{ep}^{-Z} aq & Z_{er}^{-Z} as & Z_{au}^{-Z} av & Z_{pp}^{+Z} qq^{-2Z} pq + z\ell pq & Z_{pr}^{-Z} ps^{-Z} qr^{+Z} ps & Z_{pu}^{-Z} pv^{-Z} qu^{+Z} qv & Z_{pp}^{-Z} qp & Z_{pr}^{-Z} qr & Z_{pu}^{-Z} qu \\ Z_{cp}^{-Z} cq & Z_{cr}^{-Z} cs & Z_{cu}^{-Z} cv & Z_{rp}^{-Z} sp^{-Z} rq + z\ell sq & Z_{rr}^{+Z} ss^{-2Z} rs + z\ell rs & Z_{ru}^{-Z} rv^{-Z} su^{+Z} sv & Z_{rp}^{-Z} sp & Z_{rr}^{-Z} sr & Z_{ru}^{-Z} su \\ Z_{fp}^{-Z} fq & Z_{fr}^{-Z} fs & Z_{fu}^{-Z} fv & Z_{up}^{-Z} vp^{-Z} uq + z\ell vq & Z_{ur}^{-Z} us^{-Z} vr^{+Z} vs & Z_{uu}^{+Z} vv^{-2Z} uv + z\ell uv & Z_{up}^{-Z} vp & Z_{ur}^{-Z} vr & Z_{uu}^{-Z} vu \end{array}$$

$$\Delta Z_{\sigma\alpha} = \begin{array}{c|c|c|c} Z_{bp}^{-Z} bq & Z_{br}^{-Z} bs & Z_{bu}^{-Z} bv & Z_{pp}^{+Z} qq^{-2Z} pq + z\ell pq & Z_{pr}^{-Z} ps^{-Z} qr^{+Z} ps & Z_{pu}^{-Z} pv^{-Z} qu^{+Z} ps & Z_{pp}^{-Z} qp & Z_{pr}^{-Z} qr & Z_{pu}^{-Z} qu \\ Z_{dp}^{-Z} dq & Z_{dr}^{-Z} ds & Z_{du}^{-Z} dv & Z_{rp}^{-Z} sp^{-Z} rq + z\ell sq & Z_{rr}^{+Z} ss^{-2Z} rs + z\ell rs & Z_{ru}^{-Z} rv^{-Z} su^{+Z} sv & Z_{rp}^{-Z} sp & Z_{rr}^{-Z} sr & Z_{ru}^{-Z} su \\ Z_{gp}^{-Z} gq & Z_{gr}^{-Z} gs & Z_{gu}^{-Z} gv & Z_{up}^{-Z} vp^{-Z} uq + z\ell vq & Z_{ur}^{-Z} us^{-Z} vr^{+Z} vs & Z_{uu}^{+Z} vv^{-2Z} uv + z\ell uv & Z_{up}^{-Z} vp & Z_{ur}^{-Z} vr & Z_{uu}^{-Z} vu \end{array}$$

III-3.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORÍTMO

O exemplo elementar aqui incluído tem por finalidade esclarecer a notação empregada e os detalhes das deduções matemáticas efetuadas no item anterior.

No sistema da figura(III-4), pretende-se avaliar os efeitos causados pela saída do sistema das linhas 2-3 e 3-4 (1) nas linhas 3-4(2) e 4-1. O resultado do fluxo de carga consta das tabelas (III-1) e (III-2). Os dados são fornecidos em p.u. para uma base de 100MVA.

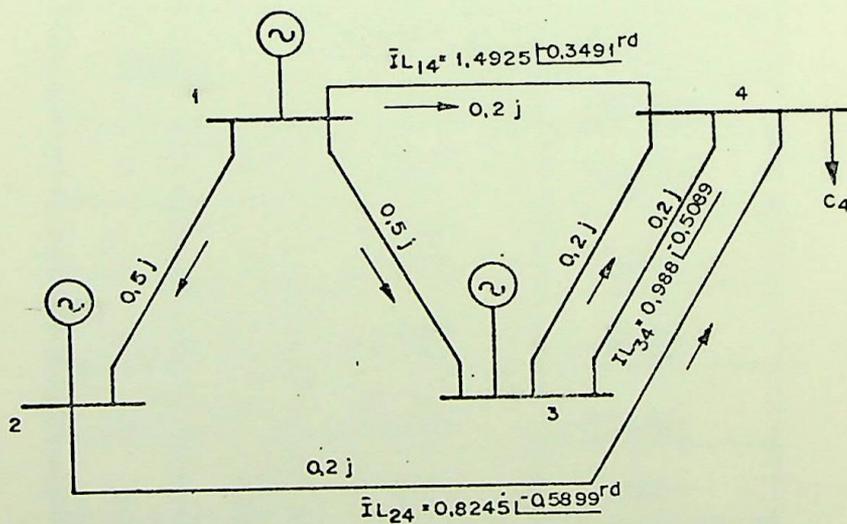


FIG. (III-4)

BARRA	POTÊNCIAS						TENSÃO	ÂNGULO rd
	GER ATIVA	GER REATIVA	CONS. ATIVA	CONS. REATIVA	TRANS. ATIVA	TRANS. REATIVA		
1	1.8500	0,2967	0.0000	0.0000	1.8500	0.2967	1.0000	0.0000
2	0.5000	0.1433	0.0000	0.0000	0.5020	0.1433	1.0000	-0.1440
3	1.6500	0.3601	0.0000	0.0000	1.6500	0.3601	1.0000	-0.1081
4	0.0000	0.0000	4.0000	0.4000	4.0000	0.4000	0.9407	-0.3028

TAB. (III-1)

BARRA		POTÊNCIAS NOS RAMOS	
		ATIVA	REATIVA
1	4	1.4210	0.2947
1	2	0.2470	0.0000
1	3	0.1820	0.0000
2	4	0.7474	0.1233
3	4 ⁽¹⁾	0.9158	0.1801
3	4 ⁽²⁾	0.9158*	0.1801

TAB. (III-2)

A matriz de impedância nodal encontrada:

ZBARRA =

Barra	2	3	4
2	0.2059	0.0735	0.0882
3	0.0735	0.1691	0.1029
4	0.0882	0.1029	0.1235

TAB. (III-3)

a) Cálculo das correntes de injeção nas barras 2 e 3:

$$[\hat{E}_\alpha - \hat{E}_\beta] \cdot [Z_{\alpha\alpha} - Z_{\beta\alpha}] [I_\alpha]$$

$$\alpha = [2 \quad 3]^t$$

$$\beta = [4 \quad 4]^t$$

$$\begin{bmatrix} \hat{E}_2 - \hat{E}_4 \\ \hat{E}_3 - \hat{E}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{22} - Z_{42} & Z_{23} - Z_{34} \\ Z_{32} - Z_{42} & Z_{33} - Z_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} 0,1176 & -0,0294 \\ -0,0147 & 0,0662 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{E}_2 - \hat{E}_4 \\ \hat{E}_3 - \hat{E}_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} 8,9997 & 3,9969 \\ 1,9996 & 15,9895 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,0917 + 0,1370j \\ 0,0963 + 0,1726j \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -1,9228 & 1,2102j \\ -3,0212 & 1,7232j \end{bmatrix}$$

b) Cálculo dos acréscimos de correntes nas linhas limitativas 3-4(2) e 4-1:

O vetor dos elementos adicionados à matriz para simular a saída das linhas críticas é igual a:

$$K' = [2-4 \quad 3-4]^t$$

A matriz de incidência da parte adicionada:

		Barra		
		2	3	4
A _{K'}	2-4	-1		1
	3-4		-1	1

$$v = \begin{bmatrix} 3 & 4 \end{bmatrix}^t$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} 4 & 1 \end{bmatrix}^t$$

$$\left[Z_{A_{k'}}^t \right]_{v_{k'}} = \begin{vmatrix} -Z_{32} + Z_{34} & -Z_{33} + Z_{34} \\ -Z_{42} + Z_{44} & -Z_{43} + Z_{44} \end{vmatrix} = j \begin{vmatrix} 0,0294 & -0,0662 \\ 0,0353 & 0,0206 \end{vmatrix}$$

$$\left[Z_{A_{k'}}^t \right]_{\sigma_{k'}} = \begin{vmatrix} -Z_{42} + Z_{44} & -Z_{43} + Z_{44} \\ -Z_{12} + Z_{14} & -Z_{13} + Z_{14} \end{vmatrix} = j \begin{vmatrix} 0,0353 & 0,0206 \\ 0,0000 & 0,0000 \end{vmatrix}$$

$$\left[A_{k'}, Z_{A_{k'}}^t, -z\ell \right] = \begin{vmatrix} Z_{22} + Z_{44} - 2Z_{24} + z\ell_{24} & Z_{23} - Z_{24} - Z_{43} + Z_{44} \\ Z_{32} - Z_{34} - Z_{42} + Z_{44} & Z_{33} + Z_{44} - 2Z_{34} + z\ell_{34} \end{vmatrix}$$

$$\left[A_{k'}, Z_{A_{k'}}^t, +z\ell \right] = j \begin{vmatrix} -0,0470 & 0,0059 \\ 0,0059 & -0,1132 \end{vmatrix}$$

$$\left[A_{k'}, Z_{A_{k'}}^t, +z\ell \right]^{-1} = -j \begin{vmatrix} -21,3914 & -1,1128 \\ -1,1128 & -8,8934 \end{vmatrix}$$

$$\left[A_{k'}, Z \right]_{k', \alpha} = \begin{vmatrix} -Z_{22} + Z_{42} & -Z_{23} + Z_{43} \\ -Z_{32} + Z_{42} & -Z_{33} + Z_{43} \end{vmatrix} = j \begin{vmatrix} -0,1176 & 0,0294 \\ 0,0147 & -0,0662 \end{vmatrix}$$

$$|\Delta(E'_v - E'_\sigma)| = -|Z_{A_{k'}}^t|_{v_{k'}} \cdot |Z_{A_{k'}}^t|_{\sigma_{k'}} \cdot |A_{k'}, Z_{A_{k'}}^t, -z\ell|^{-1} |A_{k'}, Z|_{k', \alpha} |I_\alpha|$$

$$\begin{vmatrix} \Delta(E'_3 - E'_4) \\ \Delta(E'_4 - E'_1) \end{vmatrix} = j \begin{vmatrix} -0,0059 & -0,0868 \\ 0,0353 & 0,0206 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 2,5003 & -0,5552 \\ 0,0001 & 0,5562 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_2 \\ I_3 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \Delta(E_3' - E_4') \\ \Delta(E_4' - E_1') \end{vmatrix} = -j \begin{vmatrix} -0,0148 - 0,0450j \\ 0,0883 - 0,0081j \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -1,9228 + 1,2102j \\ -3,0212 + 1,7232j \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,0955 + 0,1644j \\ -0,0929 - 0,1453j \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \Delta(IL_{34}) \\ \Delta(IL_{41}) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,8219 - 0,4775j \\ -0,7267 + 0,4646j \end{vmatrix}$$

$$\bar{I}L_{34} = 1,6847 - 0,9589j$$

$$\bar{I}L_{41} = -2,1292 + 0,9751j$$

Para exemplificar uma contingência simples a li nha crítica escolhida é 3-4(1) e as limitativas 2-4, 3-4(2) e 4-1.

a) Cálculo da corrente de injeção na barra 3:

$$\alpha = [3] \quad \beta = [4]$$

$$\hat{E}_3 - \hat{E}_4 = [Z_{33} - Z_{43}] [I_3]$$

$$I_3 = \frac{\hat{E}_3 - \hat{E}_4}{Z_{33} - Z_{43}} = -2,5968 + 1,4545j$$

b) Cálculo dos acréscimos de corrente nas linhas 2-4, 3-4(2) e 4-1:

$$v = [2 \quad 3 \quad 4]^t$$

$$\sigma = [4 \quad 4 \quad 1]^t$$

$$k' = [3 \quad -4]$$

$$A_{k'} = 3-4 \begin{array}{|c|c|c|} \hline & 2 & 3 & 4 \\ \hline & & -1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} Z_{A_{k'}}^t \\ \nu_{k'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{33} + Z_{24} \\ -Z_{33} + Z_{34} \\ -Z_{43} + Z_{44} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} 0,0147 \\ -0,0662 \\ -0,0206 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Z_{A_{k'}}^t \\ \sigma_{k'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{43} + Z_{44} \\ -Z_{43} + Z_{44} \\ -Z_{13} + Z_{14} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -0,0206 \\ -0,0206 \\ 0,0000 \end{bmatrix}$$

$$[A_k, Z_{A_k}^t, +z\ell] = Z_{33} + Z_{44} - 2Z_{34} + z\ell_{34} = -0,1132j$$

$$[A_k, Z_{A_k}^t, +z\ell]^{-1} = 8,8355j$$

$$[A_k, Z]_{k',\alpha} = [-Z_{33} + Z_{43}] = -0,0662j$$

$$\begin{bmatrix} \Delta(E'_2 - E'_4) \\ \Delta(E'_3 - E'_4) \\ \Delta(E'_4 - E'_1) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,0059 \\ -0,0868 \\ 0,0206 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,0662j \end{bmatrix} \\ -0,1132j \end{bmatrix} \quad |I_3|$$

$$\begin{bmatrix} \Delta(E'_2 - E'_4) \\ \Delta(E'_3 - E'_4) \\ \Delta(E'_4 - E'_1) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -0,0034 \\ -0,0508 \\ 0,0321 \end{bmatrix} \quad |-2,5968 + 1,4545j|$$

$$\begin{bmatrix} \Delta IL_{24} \\ \Delta IL_{34(2)} \\ \Delta L_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0246 - 0,0441j \\ 0,6593 - 0,3968j \\ -0,4148 + 0,2334j \end{bmatrix}$$

$$\bar{I}L_{24} = 0,7098 - 0,5028j$$

$$\bar{I}L_{34} = 1,5221 - 0,8782j$$

$$\bar{I}L_{41} = -1,8173 + 0,7439j$$



11-4 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

Este capítulo apresenta os procedimentos utilizados para a obtenção e utilização de todos os componentes necessários para o cálculo das correntes de injeção e das tensões nas barras de sistema, antes da ocorrência da contingência, obtida no momento do fluxo de carga, são aqui consideradas como parte dos dados a serem fornecidos.

A partir dos dados das linhas são formados os vetores $LILK(NLK,2)$ e $LILI(NLI,2)$, conforme foi descrito no capítulo anterior, item 11-2.3.

Da matriz de impedância nodal são retiradas as seguintes matrizes $ZIKI$ e $ZILI$ que são utilizadas, respectivamente, no cálculo das correntes de injeção e nas variações das correntes das linhas limitativas. Para retirar da memória operativa do computador os elementos de ZBARA componentes de $ZIKI$ e $ZILI$, utiliza-se a subrotina EXTRA. Essa subrotina converte as coordenadas matriciais de um elemento $ZB(JF,JC)$ desejado na correspondente posição N do vetor Z, onde está armazenada a matriz de impedância nodal.

No texto, para maior clareza, os elementos de ZBARA são indicados em coordenadas matriciais e não em termos de posição ocupada no vetor Z; e também por ser trivial obter, através de EXTRA, a correspondente posição N das coordenadas JF, JC.

As matrizes retiradas de ZBARA e utilizadas nos algoritmos, são armazenadas na forma de matrizes.

11-4.1 CÁLCULO DAS CORRENTES DE INJEÇÃO

III-4 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

A implementação do algoritmo apresentado consiste na obtenção e utilização de todos os componentes necessários para o cálculo das correntes nas linhas limitativas. As tensões nas barras do sistema, antes da ocorrência da contingência, obtida na solução do fluxo de carga, são aqui consideradas como parte dos dados a serem fornecidos.

A partir dos dados das linhas são formados os vetores $LKI(NLK,2)$ e $LIL(NLL,2)$, conforme foi descrito no capítulo anterior, item II-2.3 .

Da matriz de impedância nodal são retiradas pequenas matrizes ($ZIKI$ e $ZILI$) que são utilizadas, respectivamente, no cálculo das correntes de injeção e nas variações das correntes das linhas limitativas. Para retirar da memória operativa do computador os elementos de ZBARPA componentes de $ZIKI$ e $ZILI$, utiliza-se a subrotina EXTRAE. Essa subrotina converte as coordenadas matriciais de um elemento $ZB(JF,JC)$ desejado na correspondente posição N do vetor Z , onde está armazenada a matriz de impedância nodal.

No texto, para maior clareza, os elementos de ZBARRA são indicados em coordenadas matriciais e não em termos da posição ocupada no vetor Z ; e também por ser trivial obter, através de EXTRAE, a correspondente posição N das coordenadas JF , JC .

As matrizes, retiradas de ZBARRA e utilizadas neste algoritmo, são armazenadas na forma de matriz.

III-4.1 CÁLCULO DAS CORRENTES DE INJEÇÃO (I_{α})

No cálculo das correntes de injeção $I\alpha$ é necessário obter a parte da matriz ZBARRA correspondente às linhas críticas, denominadas ZIKI(NLK,NLK); uma maneira de montá-la é a seguinte:

$$DO\ 20\ LF = 1, NLK$$

$$DO\ 10\ LC = 1, NLK$$

$$JF1 = LIKI(LF, 1)$$

$$JF2 = (LIKI, 2)$$

$$JC = LIKI(LC, 1)$$

$$ZB1 = ZB(JF1, JC)$$

$$ZB2 = ZB(JF2, JC)$$

$$10\ ZIKI(LF, LC) = ZB1 - ZB2$$

Onde:

NLK = número de linhas críticas do sistema

NLL = número de linhas limitativas do sistema

Exemplificando com o sistema da figura(III-1) tem-se:

LIKI	
6	5
1	2

LILI	
2	3
4	5

LF	LC	JF1	JF2	JC	ZIKI(LF,LC)
1	1	6	5	6	ZB(6,6)-ZB(5,6)
1	2	6	5	1	ZB(6,1)-ZB(5,1)
2	1	1	2	6	ZB(1,6)-ZB(2,6)
2	2	1	2	1	ZB(1,1)-ZB(2,1)

ZIKI	
ZB(6,6)-ZB(5,6)	ZB(6,1)-ZB(5,1)
ZB(1,6)-ZB(2,6)	ZB(1,1)-ZB(2,1)

O vetor COINJ(NLK,1), que contém as correntes de injeção nas barras emissoras das linhas críticas, é calculado fazendo-se o produto da inversa de ZILI pelo vetor das tensões nas linhas críticas, encontrado na solução do fluxo de carga do sistema pré-contingência.

III-4.2 CÁLCULO DOS ACRÉSCIMOS DE CORRENTES NAS LINHAS LIMITATIVAS

A primeira etapa para o cálculo dos ΔIL consiste em achar a diferença entre as quedas de tensão nas linhas limitativas, antes e após a contingência por intermédio da equação (22).

Uma subrotina é utilizada para o cálculo dos termos modificantes da matriz $[Z_{v\alpha} - Z_{\sigma\alpha}]$, denominada ZILI(NLL, NLK), gerados pela saída das linhas críticas.

A segunda etapa é a obtenção dos ΔIL , dividindo os $\Delta(E'_v - E'_\sigma)$ obtidos pela impedância da linha correspondente.

III-4.2.1 SUBROTINA DE CÁLCULO DOS TERMOS MODIFICANTES DE ZILI

De acordo com o tipo de contingência estudado, simples ou múltipla, esta subrotina sofre alterações.

III-4.2.1a. MÚLTIPLA

Neste caso calcula-se por intermédio de ZMODIF, cada uma das parcelas componentes da matriz dos termos modificantes de ZILI. Isto é, em ZMODIF a matriz DZILI(NLL, NLK) é obtida aplicando as expressões (15), (16), (17) e (18), deduzidas no item III-3. A seguir são fornecidas as principais declarações componentes da subrotina.

A montagem da matriz $(A_k, ZA_{k'}^t + ZL_{k'})$, aqui denomi-

nada ZINDI(NLK,NLK), é feita do seguinte modo:

```
DO 20 I = 1,NLK
DO 10 J = 1,I
IF(I.EQ.J) GO TO 500
ZINDI(I,J) =ZB(LIKI(I,1),LIKI(J,1))-ZB(LIKI(I,1) ,
          LIKI(J,2) + ZB(LIKI(I,2),LIKI(J,1) -
          -ZB(LIKI(I,2),LIKI(J,2)
10 ZINDI(J,I) = ZINDI(I,J)
20 CONTINUE
500 ZINDI(I,J) =ZB(LIKI(I,1),LIKI(I,1))+ZB(LIKI(I,2)+
          +LIKI(I,2)) -2*ZB(LIKI(I,1),LIKI(I,2))
          +ZL(I)
```

Onde:

ZB(JF,JC) = Elemento da matriz ZBARRA de coordenadas JF e JC.

As matrizes $[A_k^t, Z]_{k,\alpha}$, $[ZA_k]_{\nu k}$ e $[ZA_k]_{\sigma k}$ respectivamente denominadas AZ12(NLK,NLK), AZ1(NLL,NLK) e AZ2(NLL, NLK) podem ser montadas de acordo com as declarações abaixo:

```
DO 20 I = 1,NLL
DO 10 J = 1,NLK
AZ1 = ZB(LILI(I,1),LIKI(J,1))-ZB(LILI(I,1), LIKI
      (J,2))
AZ2 = ZB(LILI(I,2),LIKI(J,1))-ZB(LILI(I,2), LIKI
      (J,2))
10 AZ12= ZB(LIKI(I,1),LIKI(J,1))-ZB(LIKI(I,2), LIKI
      (J,1)
```

Exemplificando com o sistema da figura(III-1) ,

tem-se:

I	J	LIKI(I,1)	LIKI(I,2)	LIKI(J,1)	LIKI(J,2)	ZINDI(I,J)
1	1	6	5	6	5	$ZB(6,6)+ZB(5,5)-2*ZB(6,5)+ZL(1)$
1	2	6	5	1	2	$ZB(6,1)-ZB(6,2)-ZB(5,1)+ZB(5,2)$
2	1	1	2	6	5	$ZB(1,6)-ZB(1,5)-ZB(2,6)+ZB(2,5)$
2	2	1	2	1	2	$ZB(1,1)+ZB(2,2)-2*ZB(1,2)+ZL(2)$

I	J	LILI(I,1)	LIKI(J,1)	LIKI(J,2)	AZ1(I,J)
1	1	2	6	5	$ZB(2,6)-ZB(2,5)$
1	2	2	1	2	$ZB(2,1)-ZB(2,2)$
2	1	1	6	5	$ZB(1,6)-ZB(1,5)$
2	2	1	1	2	$ZB(1,1)-ZB(1,2)$

I	J	LILI(I,2)	LIKI(J,1)	LIKI(J,2)	AZ2(I,J)
1	1	3	6	5	$ZB(3,6)-ZB(3,5)$
1	2	3	1	2	$ZB(3,1)-ZB(3,2)$
2	1	5	6	5	$ZB(5,6)-ZB(5,5)$
2	2	5	1	2	$ZB(5,1)-ZB(5,2)$

I	J	LIKI(I,1)	LIKI(I,2)	LIKI(J,1)	AZ12(I,J)
1	1	6	5	6	$ZB(6,6)-ZB(5,6)$
1	2	6	5	1	$ZB(6,1)-ZB(5,1)$
2	1	1	2	6	$ZB(1,6)-ZB(2,6)$
2	2	1	2	1	$ZB(1,1)-ZB(2,1)$

$$ZINDI = \begin{vmatrix} ZB(6,6)+ZB(5,5)-2*ZB(6,5)+ZL(1) & ZB(6,1)-ZB(6,2)-ZB(5,1)+ZB(5,2) \\ ZB(1,6)-ZB(1,5)-ZB(2,6)+ZB(2,5) & ZB(1,1)+ZB(2,2)-2*ZB(1,2)+ZL(2) \end{vmatrix}$$

$$AZ1 = \begin{vmatrix} ZB(2,6) - ZB(2,5) & ZB(2,1) - ZB(2,2) \\ ZB(4,6) - ZB(4,5) & ZB(4,1) - ZB(4,2) \end{vmatrix}$$

$$AZ2 = \begin{vmatrix} ZB(3,6) - ZB(3,5) & ZB(3,1) - ZB(3,2) \\ ZB(5,6) - ZB(5,5) & ZB(5,1) - ZB(5,2) \end{vmatrix}$$

$$AZ12 = \begin{vmatrix} ZB(6,6) - ZB(5,6) & ZB(6,1) - ZB(5,1) \\ ZB(1,6) - ZB(2,6) & ZB(1,1) - ZB(2,1) \end{vmatrix}$$

Finalmente, a matriz DZILI é encontrada, resolvendo os produtos matriciais:

$$DZILI = [AZ1 - AZ2] * [ZINDI * AZ12]$$

III-4.2.1b SIMPLES

Para este tipo de contingência, a subrotina empregada é ZMOD, onde o termo modificante do elemento ZB(JF,JC) pertencente a ZILI é calculado.

A matriz DZILI é obtida elemento por elemento, sendo usada tantas vezes quantos forem os componentes de ZILI. A subrotina anterior obtém DZILI completa e portanto é empregada uma única vez.

```
SURROUTINE ZMOD(JF,JC,J1,J2,ZB,ZL,ZM)
D = ZB(J1,J2)+ZB(J2,J2)-2 *ZB(J1,J2)+ZL
A = ZB(J1,JF)-ZB(J2,JF)
B = ZB(J2,JC)-ZB(J2,JC)
ZM = A *B/D
```

Onde:

J1 = barra emissora linha crítica
J2 = barra receptora linha crítica

III-4.2.2 CÁLCULO DAS DIFERENÇAS ENTRE AS QUEDAS DE TENSÃO

Em função da diferença entre ZMODIF e ZMOD, os $\Delta(E'_v - E'_g)$ são encontrados de modo diverso, dependendo de qual subrotina foi utilizada. Assim, para a contingência múltipla, o vetor DELTE(NLL) é obtido através das seguintes declarações:

```
CALL ZMODIF(LIKI, LILI, NLK, NLL, ZB, ZL, DZILI)
DO 20 I = 1,NLL
DO 10 J = 1,NLK
10 DELTE(I) = DELTE(I) + DZILI(I,J)*COINJ(J)
```

Para contingência simples:

```
J1 = LIKI(K,1)
J2 = LIKI(K,2),
DO 20 I=1,NLL
JF1 = LILI(I,1)
JF2 = LILI(I,2)
CALL ZMOD(JF1,J1,J1,J2,ZB,ZL,ZM)
ZMOD1 = ZM
CALL ZMOD(JF2,J1,J1,J2,ZB,ZL,ZM)
ZMOD2 = ZM
20 DELTE(I) = (ZMOD1 - ZMOD2) *COINJ(K)
```

C A P Í T U L O IV

REDESPACHO SOB CONTINGÊNCIA

IV-1 INTRODUÇÃO

Detectada uma sobrecarga em alguma linha limitativa são necessárias ações de controle para trazer o sistema a um estado de operação normal. A escolha do tipo de ação de controle a ser empregada depende da política de segurança adotada, isto é, podem ser preventivas ou corretivas.

As ações preventivas impedem que a contingência ocorra, encontrando um novo estado de operação no qual o caso base é seguro. Uma maneira de se encontrar este estado é incluindo os limites de segurança das linhas, para a condição de contingência, na obtenção do despacho ótimo.

No segundo tipo, um novo estado de operação é obtido, porém para a configuração do sistema pós-contingência, no qual as linhas não ultrapassem os limites de segurança estabelecidos.

Uma terapêutica muito empregada para qualquer dos dois tipos de ações de controle descritos acima, é a mudança da programação da geração. Diversos autores tem investigado essa solução. As técnicas desenvolvidas baseiam-se em aliviar cada linha, por um deslocamento da geração, na qual o fator de distribuição gerador-linha(*) é dominante(10,11,21,23) ou no emprego de programação matemática(20,27,33).

(*) O fator de distribuição representa a sensibilidade da potência na linha ij para uma variação na geração g.

$$IG = \frac{Zig - Zjg}{zlij}$$

As soluções encontradas no primeiro caso podem ser adequadas, porém não são ótimas. No segundo caso, contudo não há garantia que a solução exista, principalmente quando a faixa de correção possível é estreita.

Neste capítulo é desenvolvido um método para encontrar um novo despacho para o sistema pós-contingência, alterando as programações dos geradores de modo a aliviar as linhas limitativas sobrecarregadas, utilizando uma técnica de programação não linear (método do gradiente projetado). As outras devem permanecer dentro dos limites permitidos.

A função objetivo é constituída das restrições elétricas nas linhas sobrecarregadas. E as restrições matemáticas que está sujeita a função objetivo, são os limites de segurança nas linhas limitativas não sobrecarregadas e os limites de variação das potências dos geradores.

IV-2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A nomenclatura utilizada neste item é a mesma empregada no capítulo III acrescida do seguinte:

- P_G = Vetor das potências ativas nas barras de geração (não está incluído o nó de referência)
- PGI, PGS = Limites inferior e superior das potências nos geradores
- PL = Vetor das potências nas linhas
- PLI, PLS = Limites inferior e superior do fluxo de potência nas linhas
- P_N = Vetor de potência ativa nas barras do sistema
- P_C = Vetor de potência ativa nas barras de carga

- δ = Vetor dos ângulos nas barras do sistema
- δ_L = Vetor dos ângulos nas linhas limitativas
- B = Matriz de susceptância nodal para o fluxo de carga de corrente contínua
- BL = Matriz de susceptância das linhas ZL^{-1}
- Z = Inversa de B
- A_L = Matriz de incidência nodal das linhas limitativas
- N = Vetor de barras do sistema
- T = Vetor de linhas limitativas não sobrecarregadas após uma contingência
- S = Vetor de linhas limitativas sobrecarregadas após uma contingência.

IV-2.1 RESTRIÇÕES

IV-2.1.1 LIMITES DE SEGURANÇA NAS LINHAS

Os limites de segurança nas linhas tomam a forma das restrições aos fluxos de potência nos ramos limitativos não sobrecarregados. Definindo uma direção de fluxo como positiva, a seguinte inequação expressa as restrições:

$$PLI < PL_T < PLS \quad (1)$$

Utilizando um modelo linear ou de corrente contínua para representar o sistema, pode-se escrever as seguintes equações para representar mudanças nas gerações:

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= B\Delta P \\ \Delta\delta &= B\Delta P_G + B\Delta P_C \end{aligned} \quad (2)$$

Como não haverá variação na carga $\Delta P_C = 0$ Tem-se que:

$$\Delta\delta = B\Delta P_G \quad (3)$$

Para obtenção da variação das potências nos ramos, em função de uma alteração ΔP_G , tem-se:

$$\begin{aligned}\Delta \delta L &= (A \ Z) \Delta P_G \\ \Delta PL &= BL \ \Delta \delta L = BL(A \ Z) \Delta P_G\end{aligned}\quad (4)$$

O fluxo de potência nas linhas limitativas não sobrecarregadas, após a alteração nas gerações, deve continuar satisfazendo(1).

Portanto: $PL_T = \bar{P}L_T + \Delta PL_T$ (5)

$$PL_T = \bar{P}L_T + BL_T(A \ Z)_{TG} \Delta P_G \quad (6)$$

Onde: $\Delta P_G = |\bar{P}_G - P_G|$ (7)

\dot{P}_G = potência ativa dos geradores antes da ocorrência da contingência

\bar{P}_G = potências ativas dos geradores procurada.

Substituindo (6) e (7) em (1):

$$PLI < \bar{P}L_T + BL_T(A \ Z)_{TG} \Delta P_G < PLS \quad (8)$$

IV-2.1.2 LIMITES DAS GERAÇÕES

Estes constituem a outra parcela das restrições matemáticas impostas à função objetivo e são equacionadas na forma:

$$PGI < PG < PGS \quad (8.a)$$

IV-2.2 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo é constituída pelas restrições elétricas para os fluxos das linhas sobrecarregadas. Assim, para

que o fluxo, numa linha j , após a mudança na geração não ultrapasse o permitido deve-se ter:

$$PL_{sj} - PLS = 0$$

Portanto a função objetivo a ser minimizada é:

$$F(P) = \sum_{j=1}^S (PL_{sj} - PLS)^2 \quad (8.b)$$

onde: $s =$ número de linhas sobrecarregadas

IV-3 MÉTODO DO GRADIENTE PROJETADO



O método do gradiente projetado, desenvolvido por J.F.Rosen(9), é um procedimento numérico iterativo para encontrar extremos de uma função de muitas variáveis sujeitas à várias relações de restrição. Este algoritmo é uma variante do método do gradiente.

Os métodos de gradiente empregam buscas, adotando o vetor gradiente da função $F(y)$ a extremar, como direção de busca. Os valores de y são encontrados:

$$y^{(i+1)} = y^i + c \frac{\delta F^{(i)}(y)}{\delta y}$$

Quando a direção do gradiente violar em algum ponto as restrições a que está sujeita a função, uma nova direção de busca deve ser tomada. No algoritmo de Rosen a direção escolhida é a da projeção do vetor gradiente no plano de restrição violado. Assim, os valores de y encontrados a cada iteração valem:

$$y^{(i+1)} = y^i + \tau_m z^{(i)}$$

Onde: $z =$ vetor unitário da direção da projeção do gradiente num plano de restrição.

τ_m = máximo passo permitido na direção da projeção do gradiente.

Para melhor esclarecer o método, um exemplo para uma função $F(y_1, y_2)$ é analisada. A função possui um valor f no ponto (y_1, y_2) ; o problema consiste em encontrar (y_1, y_2) onde f seja mínimo. As restrições que as variáveis estão sujeitas são :

$$y_1 > 0$$

$$y_2 > 0$$

$$2y_1 - 5y_2 + 10 > 0$$

$$-4y_1 - 7y_2 + 22,5 > 0$$

$$-9y_1 - 2y_2 + 26,5 > 0$$

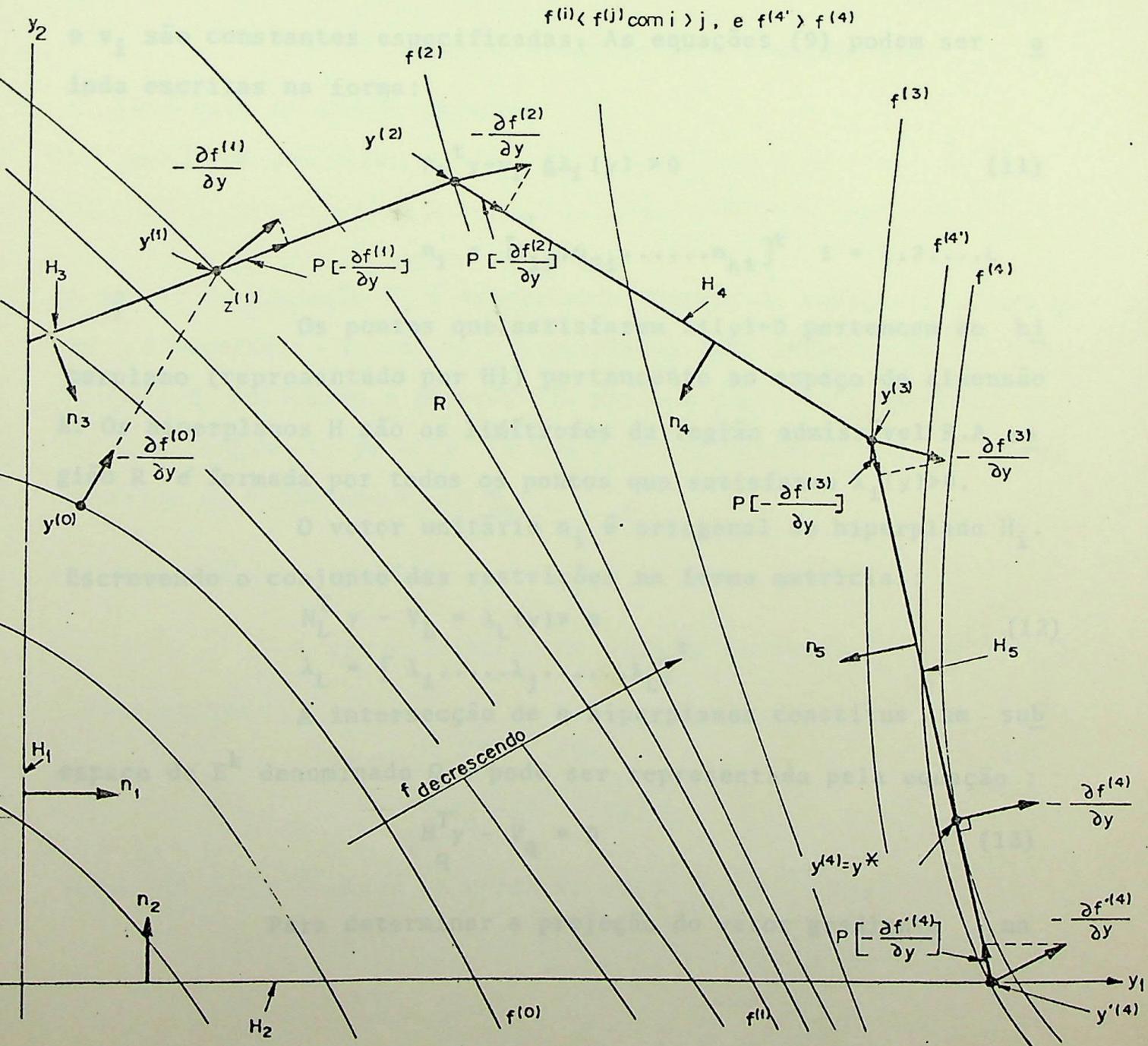
A região R é, o conjunto de pontos que satisfazem as inequações acima. Na figura (IV-1) ilustrativa do exemplo, a região R é o interior do polígono formado pelas linhas H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 , onde H_1 é reta determinada pela equação $y_1=0$, $H_2 = y_2=0$, H_3 por $2y_1 - 5y_2 + 10 = 0$ e assim por diante.

$\delta f^{(1)} / \delta y = \delta f(y^{(1)}) / \delta y =$ gradiente de $F(y)$ no ponto y

$P \left[-\delta f(y^{(1)}) / \delta y \right] = P \left[-\delta f^{(1)} / \delta y \right] =$ projeção do vetor $[-\delta f^{(1)} / \delta y]$, também chamada projeção do gradiente.

Assumindo um valor para y^0 dentro da região admissível, determina-se a direção do gradiente no ponto, $y^{(0)}$. Sendo o objetivo minimizar (y) , deve-se caminhar na direção oposta ao vetor gradiente para encontrar o mínimo de $F(y)$, sem violar nenhuma restrição ou até o valor da função crescer. Na figura (IV-1) y varia na direção de $[-\delta f^{(0)} / \delta y]$ até encontrar H_3 no ponto $y^{(1)}$.

Em $y^{(1)}$ a direção do vetor $[-\delta f^{(1)}/\delta y]$ não pode ser tomada, sem violar a restrição H3. Então y passa a variar a direção da projeção de $[-\delta f^{(1)}/\delta y]$ em H3. $P[-\delta f^{(1)}/\delta y]$ varia até o ponto $y^{(2)}$, onde H3 intercepta H4. O próximo movimento de y será na direção de $P[-\delta f^{(2)}/\delta y]$ até o ponto $y^{(3)}$. O ponto $y^{(4)}$ é alcançado com y variando na direção de $P[-\delta f^{(3)}/\delta y]$. $P[-\delta f^{(4)}/\delta y]$ mostra que a direção de busca a ser tomada é no sentido de voltar para $y^{(3)}$. O ponto $y^{(4)} = y^*$, é encontrado fazendo-se interpolação ao longo de H5.



Generalizando o procedimento descrito acima para uma função com k variáveis Y_1, Y_2, \dots, Y_k as restrições são agora L inequações da forma:

$$\sum_{j=1}^k n_{ji} Y_j - v_i > 0 \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (9)$$

Onde: n_{ji} é normalizado na forma:

$$\sum_{j=1}^k (n_{ji})^2 \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (10)$$

e v_i são constantes especificadas. As equações (9) podem ser ainda escritas na forma:

$$n_i^t y - v_i \Delta \lambda_i(y) > 0 \quad (11)$$

$$n_i = [n_{1i}, n_{2i}, \dots, n_{ki}]^t \quad i = 1, 2, \dots, L$$

Os pontos que satisfazem $\lambda_i(y)=0$ pertencem ao hiperplano (representado por H_i) pertencente ao espaço de dimensão k . Os hiperplanos H são os limítrofes da região admissível R . A região R é formada por todos os pontos que satisfazem $\lambda_i(y) > 0$.

O vetor unitário n_i é ortogonal ao hiperplano H_i .

Escrevendo o conjunto das restrições na forma matricial:

$$N_L^T y - V_L = \lambda_L(y) > 0 \quad (12)$$

$$\lambda_L = [\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_L]^t$$

A intersecção de q hiperplanos constitui um subespaço de E^k denominado Q e pode ser representada pela equação :

$$N_q^T y - V_q = 0 \quad (13)$$

Para determinar a projeção do vetor gradiente na

intersecção Q é necessário encontrar a matriz de transformação P_q , denominada matriz de projeção, que traz os vetores do espaço E^k para o subespaço Q.

$$P_q = I - N_q [N_q^t N_q]^{-1} N_q^t \quad (14)$$

A projeção do vetor $-\delta f/\delta y$ é igual a:

$$P_q [-\delta f/\delta y]$$

Os cálculos necessários para o método são:

a. gradiente da função objetivo

b. matriz de projeção

A matriz de projeção P_q é determinada através da equação(14). Para isso, é necessário ter-se os q hiperplanos cuja intersecção é o subespaço Q. Aplicando a equação(12) para um ponto $y^{(i)}$, pertencente a Q, toda componente de $\lambda_L(y^{(i)})$ com $\lambda_j=0$, H_j pertence a Q. A correspondente n_j é componente de N_q .

c. Passo máximo permitido

O vetor unitário da direção do vetor $P_q [-\delta f^{(i)}/\delta y]$

é encontrado:

$$z^{(i)} = \frac{P_q [-\delta f^{(i)}/\delta y]}{\|P_q [-\delta f^{(i)}/\delta y]\|} \quad (15)$$

Onde $\|P_q [-\delta f^{(i)}/\delta y]\|$ = norma do vetor $P_q [-\delta f^{(i)}/\delta y]$

Portanto:

$$y^{(i+1)} = y^{(i)} + \tau_j z^{(i)} \quad (16)$$

O ponto onde a reta da equação(16) encontra o hiperplano H_j é obtido do seguinte modo:

$$n_j^T y^{(i+1)} - v_j = 0$$

$$n_j^T (y^{(i)} + \tau_j z^{(i)}) - v_j = 0$$

$$\tau_j = \frac{v_j - n_j^T y^{(i)}}{n_j^T z^{(i)}} \quad (17)$$

O valor de τ_j é calculado para todos os hiperplanos não pertencentes a Q e o menor valor positivo encontrado é assumido como passo máximo permitido.

d. *Interpolação:*

Adotado o passo máximo na i -ésima iteração, se a projeção do gradiente no ponto $y^{(i+1)}$ indicar que a busca deve ser feita no sentido de retorno a $y^{(i)}$, este não deve ser aplicado a $y^{(i)}$. Para fazer essa verificação, determina-se o sinal do produto interno dos vetores:

$$z^{(i)T} [\delta f^{(i+1)} / \delta y] \quad (18)$$

Se (18) for positivo ou nulo, o passo máximo deve ser tomado e $y^{(i+1)} = y^{(i+1)}$; caso contrário, deve-se fazer uma interpolação

$$y^{(i+1)} = y^{(i)} + \theta \tau_m z^{(i)} \quad (19)$$

$$0 < \theta < 1$$

Para encontrar o valor de θ uma interpolação li

near é feita como mostra a figura (IV-2). $\theta=0$ corresponde ao ponto $y^{(i)}$, $\theta = 1$, ao valor $y^{(i+1)}$

Portanto:

$$\theta_1 = \frac{z^{(i)t} \cdot [-\delta f^{(i)} / \delta y]}{z^{(i)t} [\delta f^{(i)} / \delta y] - z^{(i)t} [-\delta f^{(i+1)} / \delta y]} \quad (20)$$

Em seguida analisa-se o gradiente no ponto:

$$y''^{(i+1)} = y^{(i)} + \theta_1 \tau_m z^{(i)}$$

formando o novo produto interno.

$$z^{(i)t} \cdot [-\delta'' f^{(i+1)} / \delta y] \underset{>}{\leq} 0$$

Se o produto interno for positivo, usa-se os pontos C e B, indicados na figura (IV-2) para uma nova interpolação. Se o produto interno for negativo, a ordenada do ponto C é também negativa, e os pontos A e C são usados na próxima interpolação. Este procedimento é repetido até o produto interno no ponto $y^{(i+1)}$ ser menor que uma tolerância adotada.

$$z^{(i)t} \cdot [\delta f^{(i+1)} / \delta y] < \epsilon_2$$

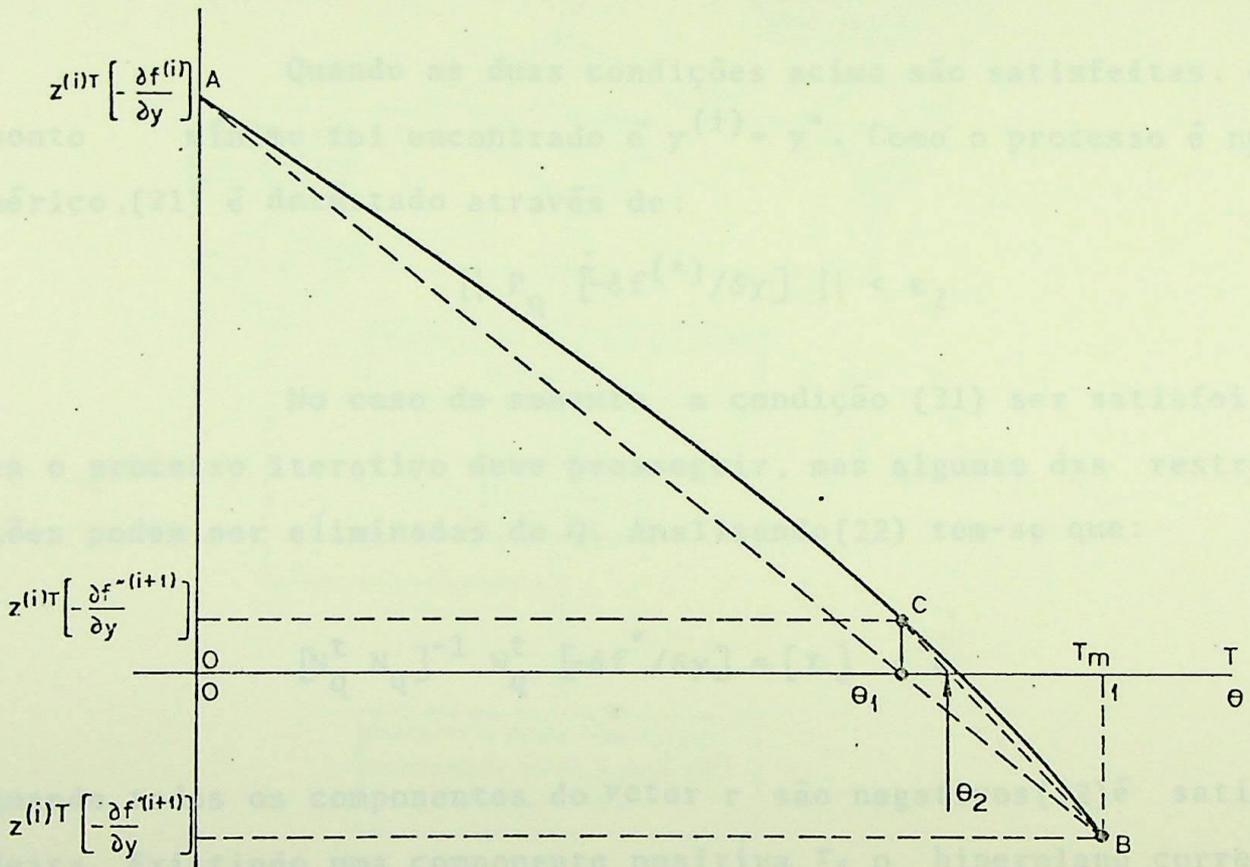


FIG. (IV.2)

O término do processo iterativo é detectado quando

$$P_q \left[-\delta f^{(*)} / \delta y \right] = 0 \quad (21)$$

e

$$\left[N_q^t N_q \right]^{-1} N_q^t \left[-\delta f^* / \delta y \right] < 0 \quad (22)$$

Quando as duas condições acima são satisfeitas, o ponto mínimo foi encontrado e $y^{(i)} = y^*$. Como o processo é numérico, (21) é detectado através de:

$$\| P_q \left[-\delta f^{(*)} / \delta y \right] \| < \epsilon_2$$

No caso de somente a condição (21) ser satisfeita o processo iterativo deve prosseguir, mas algumas das restrições podem ser eliminadas de Q. Analisando (22) tem-se que:

$$\left[N_q^t N_q \right]^{-1} N_q^t \left[-\delta f^* / \delta y \right] = [r] < 0$$

quando todos os componentes do vetor r são negativos (22) é satisfeita. Existindo uma componente positiva r_j o hiperplano correspondente H_j é retirado de P_q e o processo prossegue.

Entretanto mesmo com a condição (21) não satisfeita, pode-se retirar um Hiperplano H_j da intersecção Q. O teste é feito da seguinte maneira:

a) $\alpha_i \triangleq$ a soma dos valores absolutos dos elementos da enésima coluna da matriz $\left[N_q^t N_q \right]^{-1}$, calcule α_i $i=1,2,\dots,q$ e determine

$$\beta = \max\{\alpha_i\} \quad (23)$$

b) encontre o vetor $[r]$ pela equação (22) e determine a maior

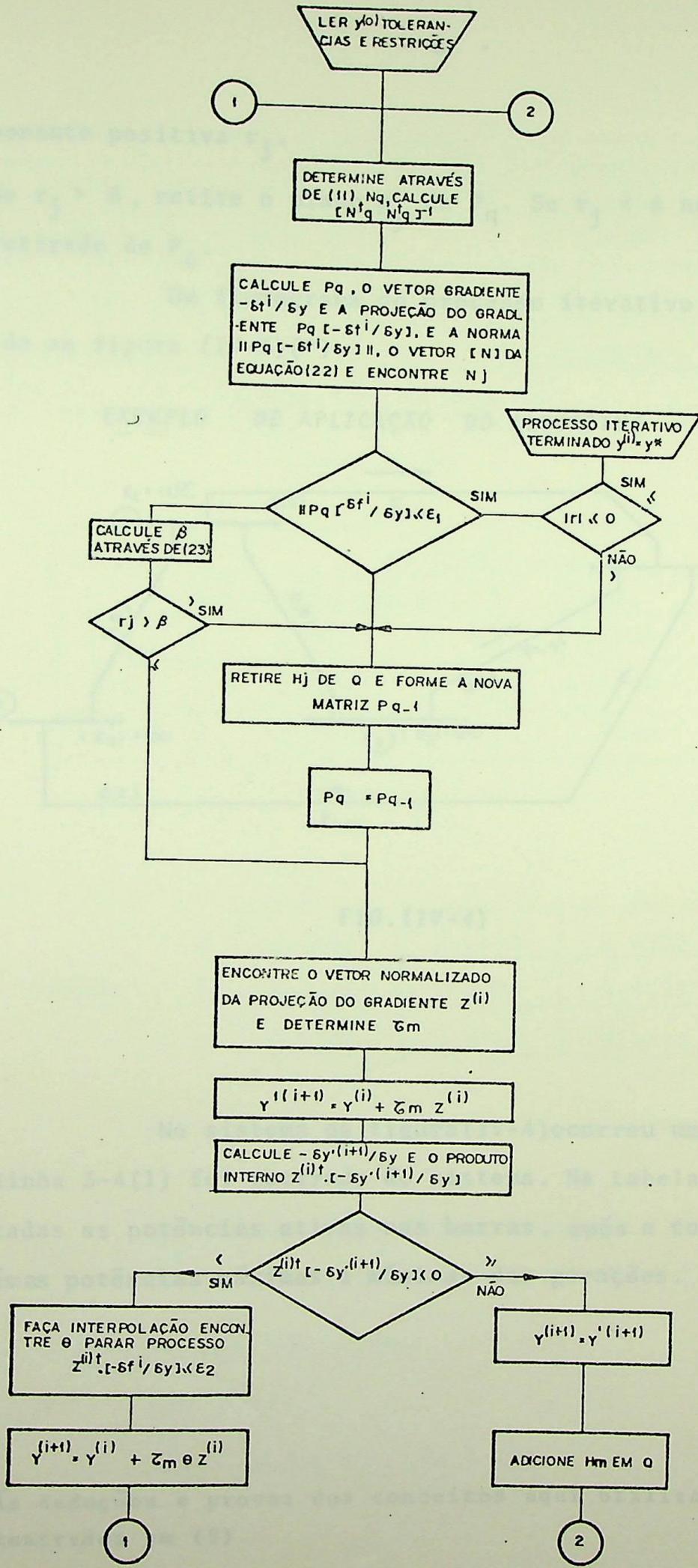


FIG. (IV-3)

componente positiva r_j .

c) Se $r_j > \beta$, retire o plano H_j de P_q . Se $r_j < \beta$ nenhum plano é retirado de P_q .

Um fluxograma do processo iterativo completo é indicado na figura (IV-3)(*).

IV.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORÍTMO

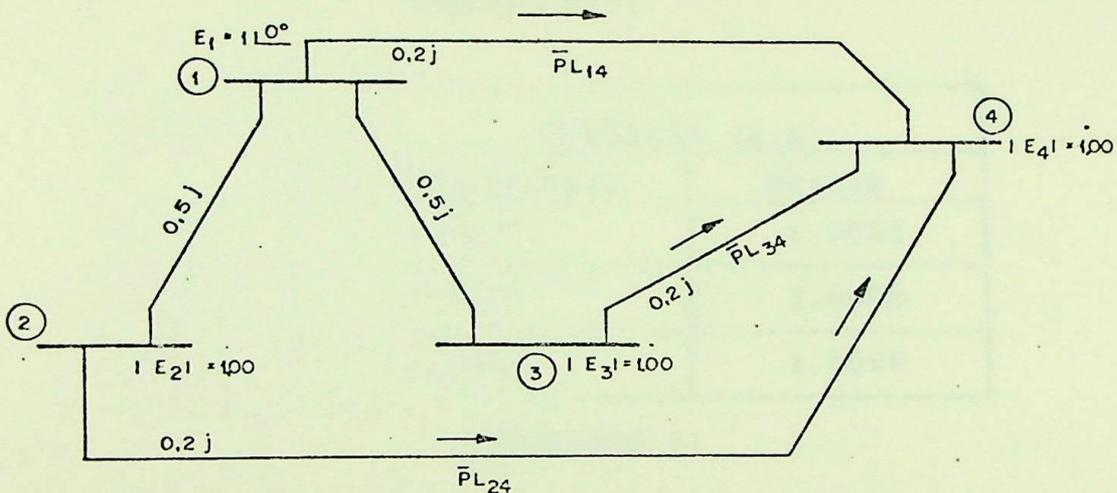


FIG. (IV-4)

No sistema da figura(IV-4)ocorreu uma contingência e a linha 3-4(1) foi retirada do sistema. Na tabela (IV-1) estão indicadas as potências ativas nas barras, após a contingência e também as potências máximas e mínimas das gerações.

(*) As deduções e provas dos conceitos aqui utilizados são en contrados em (9).

BARRA	POTENCIAS (p.u)				
	GERADA	TRANSMITIDA	CONSUMIDA	MAXIMA GERADA	MINIMA GERADA
1	1.8500	1.8500	-	3.0000	1.5000
2	0.5000	0.5000	-	3.0000	-
3	1.6500	1.6500	-	3.0000	-
4		4.0000	4.0000	-	-

TABELA(IV-1)

LINHA	POTÊNCIA (p.u)	
	Pós-Contingência	Máxima
1-4	1.8173	1.5000
2-4	0.7098	1.6000
3-4	1.5221	1.6000

TABELA(IV-2)

		2	3	4	
ZBARRA =	2	0.2078	0.0649	0.0909	j
	3	0.0649	0.2078	0.0909	
	4	0.0909	0.0909	0.1273	

Da tabela(IV-1) verifica-se que a linha sobrecarregada é:

Vetor das linhas sobrecarregadas = S = [4-1]

Vetor das linhas limitativas = T = [2-4 , 3-4(2)]

A - EQUACIONAMENTO DAS RESTRIÇÕES:

LINHAS:

$$PL_T = BL_T(A_T Z)_{TG} \Delta PG + \bar{PL}_T$$

$$A_T = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 2 & 3 & 4 \\ 2-4 & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & & -1 \\ \hline \end{array} \\ 3-4 & \begin{array}{|c|c|c|} \hline & 1 & -1 \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array}$$

$$(A_T Z)_{TG} = \begin{array}{|c|c|} \hline Z_{22} - Z_{42} & Z_{23} - Z_{43} \\ \hline Z_{32} - Z_{42} & Z_{33} - Z_{43} \\ \hline \end{array} = \begin{bmatrix} 0,1169 - 0,0260 \\ -0,0260 \quad 0,1169 \end{bmatrix} j$$

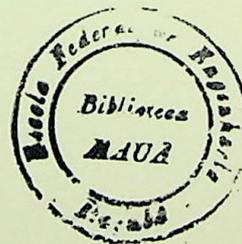
$$\bar{P}L_T = \begin{bmatrix} 0,7098 \\ 1,5221 \end{bmatrix}$$

$$BL_T = -j \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \quad BL_T A_T Z_{TG} = \begin{bmatrix} 0,5845 & -0,1300 \\ -0,1300 & 0,5845 \end{bmatrix}$$

$$PL_T = \begin{bmatrix} 0,5845 & -0,1300 \\ -0,1300 & 0,5845 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{G2} \\ \Delta P_{G3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,7048 \\ 1,5221 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 1,6000 \\ 1,6000 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Da geração

$$\begin{aligned} 1,5 < P_1 < 3,0 \\ 0 < P_2 < 3,0 \\ 0 < P_3 < 3,0 \end{aligned}$$



(25)

CARGA

$$\sum_{i=1}^G P_{Gi} = \sum_{i=1}^C P_{Ci}$$

$$P_1 + P_2 + P_3 < 4,000$$

Como P_1 está sujeito a (25) tem-se:

$$P_2 + P_3 < 2,5$$

(26)

Equacionamento da função objetivo:

$$A_S = \begin{matrix} & 2 & 3 & 4 \\ \begin{matrix} 3-4 \\ (1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & \\ & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad B_{LS} = [2]$$

$$PL_S = BL_S(A_S Z)_{SG} \Delta P_G + PL_S$$

$$PL_S = -0,4540 \Delta P_2 - 0,4540 \Delta P_3 + 1,8173$$

$$F(p) = (PL_S - 1,5000)^2$$

$$F(p) = (-0,4540 \Delta P_2 - 0,4540 \Delta P_3 + 0,3173)^2$$

B - ALGORÍTMO DE OTIMIZAÇÃO

O problema consiste em minimizar $F(p)$ com as variáveis sujeitas às restrições de linhas, geração e de corrente relacionadas no item A. Assumindo como ponto inicial:

$$P_G = \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix}$$

As equações (9), (10) e (11) escritas na forma normalizada :

$$\begin{bmatrix} -0,9761 & 0,2171 \\ 0,2171 & -0,9761 \\ -1,0000 & -1,0000 \\ 1,0000 & 0,0000 \\ 1,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 1,0000 \\ 0,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -1,6250 \\ -1,6347 \\ -2,5000 \\ 0,0000 \\ -3,0000 \\ 0,0000 \\ -3,0000 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo do gradiente:

$$\left[\frac{\delta F}{\delta P} (p) \right] = \begin{bmatrix} 0,4122 P_2 + 0,4122 P_3 - 1,1744 \\ 0,4122 P_2 + 0,4122 P_3 - 1,1744 \end{bmatrix}$$

Início do processo iterativo:

$$\left[-\delta f^{(0)}/\delta p \right] = \begin{bmatrix} 0,1983 \\ 0,1983 \end{bmatrix} \left[\frac{-\delta f^{(0)}/\delta p}{\| \delta f^{(0)}/\delta p \|} \right] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = z^{(0)}$$

Como p^0 está no interior da região admissível tem-se:

$$p_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } \| p_q \left[-\delta f^{(0)}/\delta p \right] \| > \epsilon = 0,0001$$

Cálculo do passo máximo na direção do gradiente:

$$\tau_1 = \frac{-1,6250 - [0,2171-0,9761] \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix}}{[0,2171-0,9761] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}} = 0,1620$$

$$\tau_2 = \frac{-1,6321 - [-0,9761 \ 0,2171] \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix}}{[-0,9761 \ 0,2171] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}} = 1,9827$$

$$\tau_3 = \frac{-2,5 - [-1 \ -1] \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix}}{[-1 \ -1] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}} = 0,1750$$

$$\tau_4 = \frac{-[1 \ 0] \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix}}{[1 \ 0] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}} = -0,5000$$

$$\tau_5 = \frac{-3 - [1 \ 0] \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix}}{[1 \ 0] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}} = -3,5000$$

$$\tau_6 = \frac{-[0 \ 1] \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix}}{[0 \ 1] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}} = -1,6500$$

$$\tau_7 = \frac{3 - [0 \ 1] \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix}}{[0 \ 1] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}} = -4,6500$$

Portanto:

$$p'(1) = p^{(0)} + \tau_m \cdot z^{(0)}$$

$$p'(1) = \begin{bmatrix} 0,5000 \\ 1,6500 \end{bmatrix} + 0,1620 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6620 \\ 1,8120 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\delta f^{(1)} / \delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1545 \\ 0,1545 \end{bmatrix}$$

Teste para uso do passo máximo:

$$z^{(0)t} \cdot \begin{bmatrix} -\delta f^{(1)} / \delta p \end{bmatrix} > 0$$

Logo: $p'(1) = p^{(1)}$

Reinício do processo iterativo:

$$q = 1 \quad N_1^t N_1 = 1$$

$$P_q = P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,2171 \\ -0,9761 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,2171 & -0,9761 \end{bmatrix}$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0,9530 & 0,2119 \\ 0,2119 & 0,0472 \end{bmatrix}$$

$$P_1 \begin{bmatrix} -\delta f^{(1)} / \delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1800 \\ 0,0400 \end{bmatrix}$$

$$\|P_q \begin{bmatrix} -\delta f^{(1)} / \delta p \end{bmatrix}\| > \epsilon$$

Cálculo do vetor unitário:

$$z^{(1)} = \frac{P_1 \begin{bmatrix} -\delta f^{(1)} / \delta p \end{bmatrix}}{\|P_1 \begin{bmatrix} \delta f^{(1)} / \delta p \end{bmatrix}\|}$$

$$z^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,9762 \\ 0,2169 \end{bmatrix}$$

Cálculo do novo passo máximo τ_m :

$$\tau_2 = \frac{-1,6347 - \begin{bmatrix} -0,9761 & 0,2171 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,6620 \\ 1,8120 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} -0,9761 & 0,2171 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,9762 \\ 0,2169 \end{bmatrix}} = -1,5257$$

Os valores obtidos para as outras faces do hiperplano:

$$\tau_3 = 0,0218$$

$$\tau_4 = -0,6746$$

$$\tau_5 = -3,7477$$

$$\tau_6 = -8,5851$$

$$\tau_7 = -22,2165$$

Logo $\tau_m = \tau_3 = 0,0277$

$$p^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,6620 \\ 1,8120 \end{bmatrix} + 0,0218 \begin{bmatrix} 0,9762 \\ 0,2169 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6833 \\ 1,8167 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\delta f^{(2)} \\ \delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1439 \\ 0,1439 \end{bmatrix}$$

$$z^{(1)t} \cdot \begin{bmatrix} -\delta f^{(2)} \\ \delta p \end{bmatrix} > 0$$

Logo:

$$p^{(2)} = p^{(2)}$$

Teste para retirada de M_1 da Matriz de Projeção P_1 :

$$N_1 = \begin{bmatrix} 0,9761 \\ 0,2171 \end{bmatrix}$$

$$\beta = \sum_{i=1}^2 [n_i] = [0,9762] + [0,2168] = 1,1930$$

$$N_1 \begin{bmatrix} -\delta f^{(1)} / \delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,9762 & 0,2168 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,1575 \\ 0,1575 \end{bmatrix} = 0,1879$$

$r_1 < \beta \rightarrow$ nenhum plano \bar{e} retirado de P_1 .

Reinício do processo iterativo:

$$q = 1, 3$$

$$N_q = [n_1 \ n_3] = \begin{bmatrix} 0,2171 & -1 \\ -0,9761 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[N_q^t \ N_q]^{-1} = \begin{bmatrix} 1,4052 & -0,5335 \\ -0,5335 & 0,7026 \end{bmatrix}$$

$$N_q [N_q^t N_q]^{-1} N_q^t = \begin{bmatrix} 1,0000 & 0,0001 \\ 0,0001 & 1,0000 \end{bmatrix}$$

$$P_q = P_{13} = \begin{bmatrix} 0,0000 & -0,0001 \\ -0,0001 & 0,0000 \end{bmatrix}$$

$$P_q \begin{bmatrix} -\delta f^{(2)} \\ \delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix}$$

$$\| P_{13} \begin{bmatrix} -\delta f^{(2)} \\ \delta p \end{bmatrix} \| < \epsilon = 0,0001$$

Portanto $p^{(2)}$ é mínimo.

Verificação para mínimo restrito global:

$$[N_q^t \ N_q]^{-1} N_q^t \begin{bmatrix} -\delta f^{(2)} \\ \delta f \end{bmatrix} = [r] \leq 0$$

$$\begin{bmatrix} 1,4052 & -0,5335 \\ -0,5335 & 0,7026 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,2171 & 0,9761 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,1439 \\ 0,1439 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ -0,1439 \end{bmatrix} = [r]$$

Como todos os componentes de $[r]$ satisfazem a condição necessária e suficiente, $p^{(2)} = p^*$, mínimo restrito global.

Logo:

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6820 \\ 1,8120 \end{bmatrix}$$

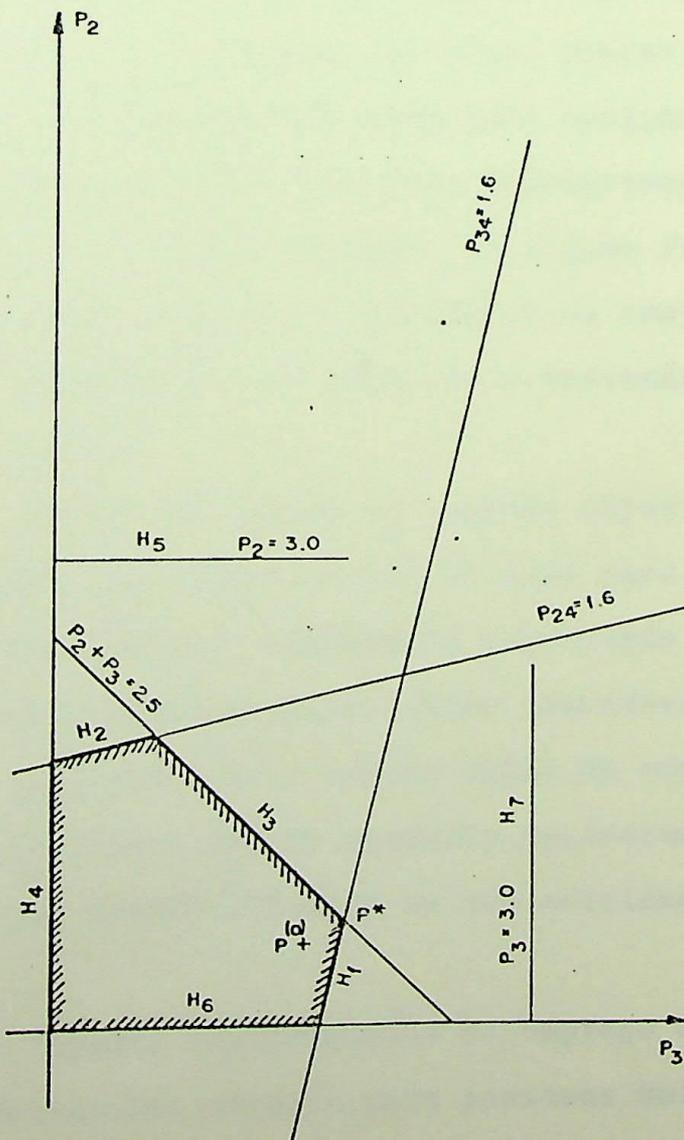


FIG. (IV-5)

C A P Í T U L O V

V-1 CONCLUSÕES

Este trabalho foi elaborado levando-se em consideração dois objetivos. O primeiro deles é permitir que as diversas partes que o compõem fossem seccionáveis, podendo ser consideradas completamente independentes. O segundo é que servisse de ponto de partida para futuras pesquisas.

Assim, de acordo com o primeiro, o algoritmo de montagem da matriz de impedância nodal, aqui descrito, pode ser utilizado não só em um estudo de contingência como também em qualquer outra aplicação que necessite de montagem de ZBARRA. Por sua vez, a análise de contingência, propriamente dita, apesar de necessitar da matriz de barras, não requer que esta seja obrigatoriamente obtida pelo algoritmo aqui indicado. Por fim, a programação da geração pode ser feita para um sistema no qual, de alguma forma, forem detectadas linhas sobrecarregadas. A eficiência do conjunto de algoritmos desenvolvidos, entretanto será maior se a sistemática proposta for integralmente seguida.

No que se refere ao segundo objetivo, a análise de contingência elaborada poderá servir de base para análises de contingências probabilísticas, estudos de capacidade de intercâmbio entre sistemas interligados, despacho ótimo considerando condições de contingência e etc. Igualmente, outras ações de controle poderão ser pesquisadas utilizando o método proposto. Evidentemente, cada um dos algoritmos pode ser ainda melhorado na sua eficiência e flexibilidade.

Algumas considerações no emprego dos algoritmos podem ainda ser feitas. Por exemplo, para sistemas muito grandes e com elevado número de interligações por nó, o dimensionamento do vetor

Z deve ser cuidadoso. Dependendo da quantidade de linhas relevantes, e de sua localização no sistema, o arranjo de memórias reservado para armazenar ZBARRA, poderá ser insuficiente. Isto porque o número de eixos inicialmente conservados, poderá superar o dos eixos relevantes previstos.

Por outro lado, o modelo usado para representar o sistema no redespacho é linear e portanto possui as imprecisões inerentes a esse tipo de modelo. Para alguns casos, se aplicado, poderá levar a erros grosseiros.

Não existindo conhecimento prévio do comportamento de um sistema, este poderá ser estabelecido pela própria análise de contingência. Para tanto, várias condições devem ser simuladas e os estados de operação decorrentes analisados. Assim sendo, o método pesquisado é bastante flexível e adaptado a esse tipo de aplicação, uma vez que vários casos de contingência simples podem ser obtidos sem necessidade de obter a ZBARRA para cada caso.

V-2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA

A utilização de sistemas complexos para ilustrar o programa desenvolvido, não traria nenhuma contribuição adicional, uma vez que o algoritmo em si, não depende do tamanho do sistema analisado. Portanto a análise de contingência foi feita para o sistema, de IEEE-14BARRAS.

- Dados do sistema:

NB = número de barras = 14
NL = número de ramos = 20
JR = barra de referência = 1

DADOS DAS LINHAS:

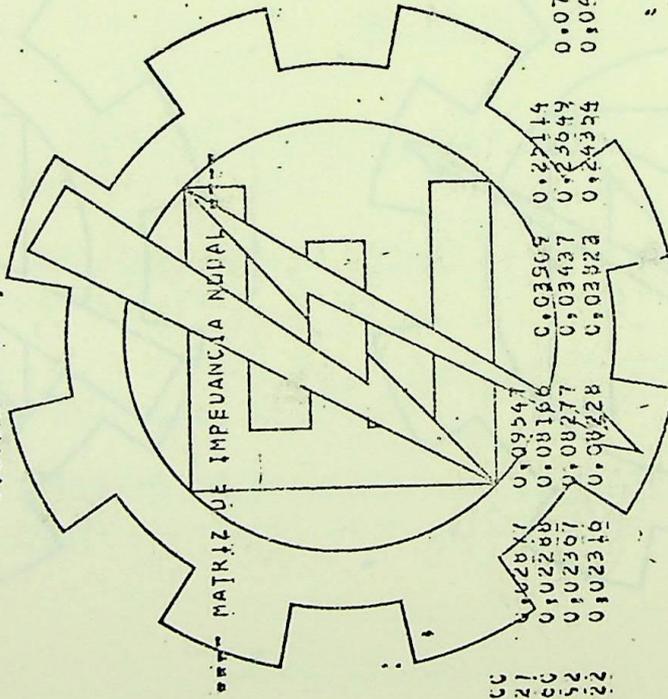
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	TIPO DE RAMO	RESISTENCIA (p.u)	REATANCIA (p.u)
1	2	0	0.01938	0.05917
1	5	2	0.05403	0.22304
2	3	0	0.04699	0.19797
2	4	2	0.05811	0.17632
2	5	1	0.05695	0.17388
3	4	0	0.06701	0.17103
4	5	0	0.01335	0.04211
4	7	0	0.00000	0.20912
4	9	0	0.00000	0.55618

5	6	0	0.00000	0.25202
6	11	0	0.09498	0.19890
6	12	2	0.12291	0.25581
6	13	1	0.06615	0.13027
7	8	0	0.00000	0.17615
7	9	0	0.00000	0.11001
9	10	0	0.03181	0.08450
9	14	0	0.12711	0.27038
10	11	0	0.08205	0.19207
12	13	0	0.22092	0.19988
13	14	0	0.17093	0.34802

DADOS DE FLUXO DA CARGA -CASO BASE:

BARRA	TENSÃO (p.u)	ÂNGULO
1	1.0600	0.0
2	1.0450	- 4.98
3	1.0100	-12.73
4	1.0171	-10.31
5	1.0187	- 8.76
6	1.0700	-14,22
7	1.0613	-13.36
8	1.0900	-13.36
9	1.0557	-14.93
10	1.0508	-15.09
11	1.0568	-14.79
12	1.0552	-15.07
13	1.0503	-15.15
14	1.0354	-16.03

SISTEMA 1



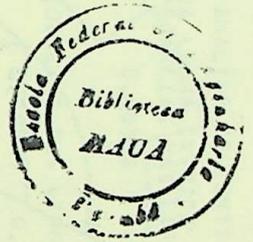
PARNA

2	0,01213	0,04961	0,02340	0,08700	0,02281	0,09547	0,03507	0,27114	0,07873	0,31332
3	0,01062	0,03618	0,02183	0,07421	0,02280	0,08166	0,03437	0,25644	0,04846	0,27028
4	0,01184	0,03952	0,02497	0,08260	0,02367	0,08777	0,03428	0,24354		
5	0,01086	0,03736	0,02453	0,08152	0,02310	0,08328				
6	0,01099	0,03754	0,02482	0,08222						
7	0,01091	0,03746								

3102.1

ESCOLA FEDERAL

MAN-10



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

LIVROS

- 1 - BROWN, H.E. Grandes sistemas elétricos - métodos matriciais. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1977.
- 2 - COMPUTARIZED operating. of power systems. In: INTERNATIONAL Symposium, COPO'S 75. Proceedings. Amsterdam, Elsevier Scientifics, 1976.
- 3 - LUENBERGER, D.G. Introduction to linear and nonlinear programming. Reading, Addison-Wesley, 1973.
- 4 - KUESTER, J.L. & WIZE, J.H. Optimizations techniques with fortran. New York, Mc-Graw-Hill, 1973.
- 5 - ELGERD, O.I. Electric energy systems theory: an introduction. New York, Mc-Graw-Hill, 1971.
- 6 - KIRK, D.E. Optimal control theory: an introduction. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1970.
- 7 - EL-ABIAD, A. H. & STAGG, G.W. Computer methods in power systems analysis. New York, Mc-Graw-Hill, 1968.
- 8 - NATHAN, C. Control of generation and power flow of interconnected power systems. New York, John Wiley, 1966.

A R T I G O S

- 9 - ROSEN, J. B. The gradient projection method for nonlinear programming. Part I: Linear constraints. Journal Society for Industrial and Applied Mathematics, 8: 181-217, 1960.
- 10 - MacARTHUR, C.A. Transmission limitations computed by superposition. AIEE PAS, 80: 827-831, Dec. 1961.
- 11 - EL-ABIAD, A. H. & STAGG, G. W. Automatic evaluation of power system performance: effects of line and transformer outages. AIEE PAS, 81 : 712-716, Feb. 1963.
- 12 - BROWN, H. E. et al. Power flow solution by impedance matrix iterative method. AIEE PAS, 82 : 1-10, Apr. 1963.

- 13 - DY LIACCO, T. E. The adaptive reliability control system. Trans. IEEE PAS , 86 : 517-531, May 1967.
- 14 - PESCHON, J. et al. Sensitivity in power systems. Trans. IEEE PAS, 87 : 1687,1696, Aug. 1968.
- 15 - BROWN, H. E. Contingencies evaluated by a Z-matrix method. Trans. IEEE PAS, 88 : 409-411, Apr. 1969.
- 16 - UEMURA, K . Power flow solution by a Z-matrix type method and its application to contingency evaluation. Power Industry Computer Application Conference. Proceedings. 1971. p. 397-401.
- 17 - KALTENBACH, J. C. & HAYDU, L. P. Optimal corretive rescheduling for power system security. Trans. IEEE PAS, 90 : 843-851, Mar/Apr. 1971.
- 18 - ARVANITIOLIS, N. V. & ROSING, J. The use of objetive functions in real power dispatching Trans. IEEE PAS, 90 : 1742-1751, Nov./Dec. 1971.
- 19 - TINNEY, W. F. Compensation methods for network solution by optimally ordered triangular factorization . Trans. IEEE PAS, 91 : 123-127, Jan./Feb. 1972.
- 20 - DANIELS, H. & CHENG, MO-SHING An optimization technique and security calculations for dispatching computers. Trans. IEEE PAS, 91 : 883-888, May/Jun. 1972.
- 21 - BROWN, H. E. Interchange capability and contingency evaluation by a Z-matrix method. Trans. IEEE PAS, 9 : 1827-1832, Oct. 1972.
- 22 - TINNEY, W. F. et al. Iterative linear AC power flow solution for first approximative outages studies. Trans. IEEE PAS, 91 : 2048-2056, Sep./Oct. 1972.
- 23 - LANDGREN, G. L et al. Transmission interchange capability: analysis by computer. Trans. IEEE PAS, 91 : 2405-2414, Nov./Dec. 1972.
- 24 - BROWN, H. E. Simultaneous interchange optmization by means Z-matrix In: Power Industry Computer Application, Conference. Proceedings. Minneapolis, 1973. p. 250-254.
- 25 - UEMURA, K. & MATAUKI, J. Contingency evaluation methods of power systems by partial correction OF - Z-matrix. Inc: Power Industry Computer Application, Conference. Proceedings. Minneapolis, 1973. p. 397-401.

- 26 - HEYDT, G. T. & GRADY, W. M. A Z-matrix method for fast three phase load flow calculation. Inc: Power Industry Computer Application, Conference. Proceedings. Minneapolis, 1973.
- 27 - PODMORE, R. Economic power dispatch with line security limits. Trans. IEEE PAS, 93 : 289-295, Jan./Feb. 1974.
- 28 - IBRAHIN, S. A. & SACHEV, M. S. A fast approximative technique for outage studies in power system planning and operation. Trans. IEEE PAS, 93 : 1133,1142, Sep./Oct. 1974.
- 29 - HEYDT, G. T. & GRADY, W.M. A matrix method for optimal var siting. Trans. IEEE PAS, 94 : 1214-1221, Jul./Aug. 1975.
- 30 - WOLLENBERG, B. F. & KENNETH, A. F. A cost effective security dispatch methodology. Trans. IEEE PAS, 95 : 401-410, Jan./Feb. 1975.
- 31 - ALLAN, R. N. & AL-SHAKARCHI Probabilistic A.C. load flow. Proceedings of IEE, 123 (6) : 531-536, Jun. 1976.
- 32 - ABOYTES, F. Stochastic contingency analysis. Trans. IEEE PAS, 97: 335-341, Mar./Apr. 1978.
- 33 - MAMANDUR, K. R. C. & BERG, G. S Economic shift in electric power generation with line flow constrains. Trans. IEEE PAS, 97 : 1613-1626, Sep./Oct. 1978.
- 34 - REITAN, D. K. & KRUEMPEL, K. C. Modification of the bus impedance matrix for system changes involving mutual coupling. In IEEE. Proceedings. 1969. p. 1432.

APENDICE I

OPERADORES DE SELECAO EM SISTEMAS ELETRICOS DE POTENCIA

1 INTRODUÇÃO

Este tema visa cobrir o que é, segundo nossa experiência, uma urgente necessidade para o estudo dos algoritmos de planejamento e análise de sistemas.

Com efeito, a informação sobre os sistemas elétricos é fornecida ao computador na forma "estruturas de dados" (data structures). Uma parcela substancial na execução dos cálculos é o manejo destas estruturas. Isto significa, operações que não afetam os valores numéricos da estrutura, mas que envolvem ações tais como escolhas, reordenamentos, inserções; ou seja, alterações na forma de estrutura, entretanto é mantido intacto o valor (numérico) dos itens. Já nos princípios desta década, o professor Timney, distinto pesquisador da BPA (Bonnevillle Bower Administration), e responsável por muitos dos avanços na área de sistemas elétricos, advertia que mais da metade do volume de computação nos programas usados pela indústria elétrica, era gasto em operações de manejo de estruturas de dados.

Nesta seção pretendemos expor apenas os fundamentos de tais operações. Grande parte das idéias desenvolvidas é baseada nos trabalhos do professor Iverson, da IBM, criador da linguagem APL e do professor Mayer pesquisador da Boeing Aircraft Consulting Division.

2 CATÁLOGOS

O conjunto dos números naturais até n , $(1, 2, \dots, n)$ é chamado de conjunto índice n .

Uma aplicação bijetiva do conjunto índice n sobre um conjunto arbitrário k de números naturais, (excluindo o 0) será dito catálogo de longitude n .

Seja \underline{c} um catálogo, de longitude n . Seja ainda uma tupla \underline{x} (também pode ser uma matriz fila ou coluna) de longitude m . O símbolo $\underline{x}_{\underline{c}}$ indica a tupla tal que $(\underline{x}_{\underline{c}})_i = \underline{x}(\underline{c})_i$ para todo i no conjunto índice.

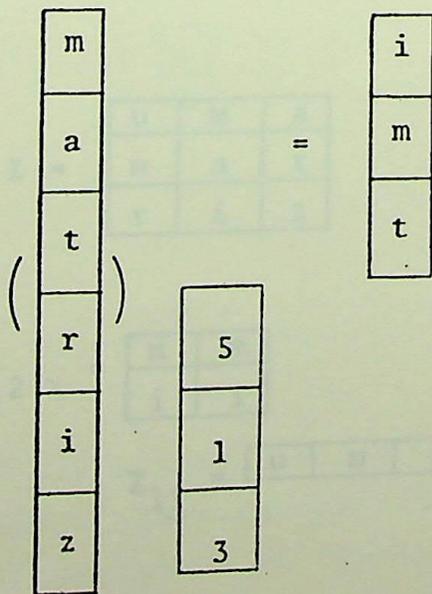
Note-se que, para que $\underline{x}_{\underline{c}}$ tenha sentido deve-se ter $(\underline{c})_i < m$ para todo i . $\underline{x}_{\underline{c}}$ terá longitude n . Neste caso, $\underline{x}_{\underline{c}}$ é chamado a "Escolha Direta em \underline{x} segundo \underline{c} ".

Exemplo 1:

$$\langle m, a, t, i, z \rangle = \langle i, m, t \rangle$$

$$\langle 5, 1, 3 \rangle$$

Também será empregado notação em coluna.



Quando o catálogo \underline{c} é composto de um elemento ($n=1$), podem-se dispensar as \langle, \rangle , indicando apenas: x_i

Exemplo 2:

$$\langle m, a, t, r, i, z \rangle_3 = t$$

Se $(\underline{c})_i = i$, o catálogo é chamado de "identidade" será representada pelo símbolo $\underline{1}$. Se o conjunto k é igual ao conjunto índice, \underline{c} é dito "relocação". Quando \underline{c} é uma relocação, existe o catálogo inverso \underline{c}^{-1} definido como

$$\underline{c}^{-1}(\underline{c}_i) = i$$

Quando \underline{c} não for uma relocação, a idéia de "inversão" ainda pode ser implementada, tal como mostra a subseção 4.

3. ESCOLHAS NAS MATRIZES

Seja a matriz $Z \langle m, n \rangle$ e $\underline{c}, \underline{d}$ dois catálogos sobre subconjuntos dos conjuntos índice de cardinalidade m, n respectivamente.

Então a matriz $Z_{\underline{c}\underline{d}}$ é dita de "escolha de Z " segundo $\underline{c}, \underline{d}$

Exemplo 3: Seja:

$$Z = \begin{array}{|c|c|c|} \hline u & m & a \\ \hline m & a & t \\ \hline r & i & z \\ \hline \end{array}$$

Então:

$$Z_{\langle 1, 3 \rangle, \langle 2, 2 \rangle} = \begin{array}{|c|c|} \hline m & m \\ \hline i & i \\ \hline \end{array}$$

$$Z_{\underline{1}\underline{1}} = Z$$

$$Z_{\underline{1}\underline{1}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline u & m & a \\ \hline \end{array}$$

Exemplo 4:

Seja Z a matriz de impedância de barra de um sistema elétrico, sendo que a barra i -ésima ocupa a fila e coluna c_i -ésimas da matriz. (1) (c opera como um catálogo ligando os "eixos" elétricos com os matriciais).

Seja ainda y uma lista dos números das barras cuja informação interessa-nos "extrair" de Z . A continuação indicam-se valores de c (em forma de matriz coluna) e o esquema de Z .

nº de barra	nº de fila/coluna	1	2	3	4	5
1	5	33	34	32	35	31
2	3	43	44	42	45	41
3	1	23	24	22	25	21
4	2	53	54	52	55	51
5	4	13	14	12	15	11

No ângulo inferior direito das localizações de Z , indicam-se as barras associadas à informação contida. (impedância entre tais barras).

Se desejássemos agora extrair os dados relacionados às barras 1,2 deveríamos introduzir o segundo seletor

$$y = \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{1} \\ \boxed{2} \end{matrix}$$

(1) O fato de não ocupar a barra i o mesmo número i de eixo matricial surge das características especiais do algoritmo corretamente empregado na construção de Z .

A submatriz contendo tal informação será a $(Z_{\underline{cc}})_{\underline{yy}}$.
Calculando primeiro $Z_{\underline{cc}}$, resulta.

1	11	12	13	14	15
2	21	22	23	24	25
3	31	32	33	34	35
4	41	42	43	44	45
5	51	52	53	54	55

a seleção \underline{c} tem reordenado os eixos de jeito que em $Z_{\underline{cc}}$ existe correspondência entre números de barras e número de eixo matricial.

Agora, $(Z_{\underline{cc}})_{\underline{yy}}$ pode-se calcular facilmente como

$$(Z_{\underline{cc}})_{\underline{yy}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{matrix} \boxed{11} & \boxed{12} \\ \boxed{21} & \boxed{22} \end{matrix} \end{matrix}$$

Análise das operações definidas anteriormente, permite concluir

que $Z_{\underline{cc}} = Z_{\underline{c}_y \underline{c}_y}$

ora,

$$\underline{c}_y = \begin{matrix} \boxed{5} \\ \boxed{3} \end{matrix}$$

então

$$Z_{\underline{c}_y \underline{c}_y} = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{Antigos eixos matriciais} \\ 5 & 1 \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Novos eixos matriciais} \\ 24 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 & 2 \end{matrix} & \begin{matrix} \boxed{11} & \boxed{12} \\ \boxed{21} & \boxed{22} \end{matrix} \end{matrix} \leftarrow \text{barras}$$

Obtemos o mesmo resultado com muito menor número de operações.

4 INVERSÃO POR SUBCATÁLOGO

Seja \underline{c} um catálogo sobre k , e \underline{c}' um catálogo sobre $K' \subseteq K$. \underline{c}' é dito um "subcatálogo" de \underline{c} .

O símbolo $(\underline{c}^{-1})_{\underline{c}'}$ é o catálogo definido $((\underline{c}^{-1})_{\underline{c}'})_i = j \text{ se } \underline{c}_j = \underline{c}'_i$

Exemplo:

$$\underline{c} = \langle 17, 4, 9, 11, 2 \rangle \quad \underline{c}' = \langle 11, 4 \rangle$$

$$((\underline{c}^{-1})_{\underline{c}'})_1 = 4 \text{ pois } \underline{c}_4 = \underline{c}'_1 = 11$$

$$((\underline{c}^{-1})_{\underline{c}'})_2 = 2 \text{ pois } \underline{c}_2 = \underline{c}'_2 = 4$$

Então:

$$\langle 17, 4, 9, 11, 2 \rangle^{-1} = \langle 4, 2 \rangle$$

$$\langle 11, 4 \rangle$$

Na prática, para cada \underline{c}'_i pesquisa-se \underline{c} até achar o índice j tal que $\underline{c}_j = \underline{c}'_i$. Cada teste de um \underline{c}_j implica então numa comparação entre \underline{c}_j e \underline{c}'_i . Este processo é chamado de busca associativa (vide a subseção 7 para implementação).

$(\underline{c}^{-1})_{\underline{c}'}$; é dito a "inversão" de \underline{c} pelo subcatálogo \underline{c}' . Ela sempre existe, ainda quando \underline{c}^{-1} não existir.

Note-se que \underline{c} é identidade, a sua inversão é \underline{c}' igual a \underline{c}' para qualquer \underline{c}' , compatível, entretanto, para qualquer \underline{c} , $(\underline{c}^{-1})_{\underline{c}}$ é identidade.

Note-se ainda que se \underline{c} é uma relocação e \underline{c}' identidade, $(\underline{c}^{-1})_{\underline{c}'}$ é o catálogo inverso da relocação; isto é:

$$(\underline{c}^{-1})_{\underline{c}} = \underline{c}^{-1}$$

Finalmente, observa-se que $\underline{c}(\underline{c}^{-1})_{\underline{c}'} = \underline{c}'$ para qualquer \underline{c} ou \underline{c}' .

Exemplo: Para o catálogo do exemplo anterior

$$\underline{c}(\underline{c}^{-1})_{\underline{c}'} = \underline{c} \langle 4, 2 \rangle \quad \langle 11, 4 \rangle$$

Exemplo:

Quase sempre, as barras não estão numeradas a partir de 1 em ordem sucessiva, mas obedecendo a um código adhoc. Nestas condições, a informação sobre a correspondência é providenciada por um catálogo \underline{c} que liga índice matricial a código de barra (em vez de código a índice como no exemplo anterior).

Seja neste exemplo:

<i>Índice matricial</i>	1	9	<i>nº de barra</i>
	2	2	
$c =$	3	5	
	4	3	
	5	7	

A matriz Z conterá agora a seguinte informação:

99	92	95	95	97
29	22	25	23	27
59	52	55	53	57
39	32	35	33	37
79	72	75	23	77

Os números dentro indicam os números de barras atingidas (na realidade, o que está nas locações da matriz são os valores das correspondentes impedâncias).

Se desejássemos extrair a informação das barras 5 e 7, deveríamos começar por observar que:

$$c' = \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix}$$

é um subcatálogo de \underline{c} . Note-se ainda que: $(\underline{c}^{-1})_{c'} = \underline{d} = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}$

Indica precisamente os índices matriciais necessários. Portanto, a submatriz:

$$Z_{dd} = Z \begin{array}{|c|} \hline 3 \\ \hline 5 \\ \hline \end{array}, \begin{array}{|c|} \hline 3 \\ \hline 5 \\ \hline \end{array}$$

nos dará a informação procurada

5. CATÁLOGOS ORDENADOS E COMPLEMENTOS

Se $i < j$ e $c_i < c_j$, o catálogo c é dito ordenado.

Seja c um catálogo ordenado sobre k , de longitude n .

Seja $p > n$ e \bar{K} o complemento de K com respeito ao conjunto índice de cardinalidade p . O catálogo ordenado \bar{c} sobre \bar{K} é dito complemento de c .

O catálogo ordenado \bar{c} em \bar{K} é dito "complemento" de c . Note-se que a longitude de \bar{c} é $\max K - |K|$

Exemplo: a noção de complemento é muito útil na análise de sistemas elétricos. Seja por exemplo a extração das impedâncias de transferência entre a área das barras 5m,7 consideradas no exemplo anterior.

O primeiro passo é o cálculo de complemento de \underline{d} , que representa os índices matriciais ocupados pelas barras fora da área. Resulta:

$$\underline{\bar{d}} = \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 4 \\ \hline \end{array}$$

O segundo passo é o cálculo de $Z_{\underline{\bar{d}}\underline{\bar{d}}}$, que representa justamente as impedâncias.

$$Z_{\underline{\bar{d}}\underline{\bar{d}}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 59 & 52 & 53 \\ \hline 79 & 72 & 73 \\ \hline \end{array}$$

6 REORDENAÇÃO E PESQUISA NOS CATÁLOGOS

No exemplo anterior o complemento de \underline{d} pode ser calculado porque ele estava ordenado. Isto não acontece em geral. A solução é ordenar o catálogo relocando os itens. A relocação deve ser acompanhada pelos índices, que devem então figurar explicitamente no catálogo. Assim, o catálogo do exemplo ficaria

		↓ Índice anteriores de \underline{c}	
$\underline{c}_R =$	1	2	2
	2	4	3
	3	3	5
	4	5	7
	5	1	9

← barras

A pesquisa deste catálogo para procurar o índice associado a uma barra é muito mais rápida, (a técnica a empregar é chamada de Busca Binária).

Os aspectos computacionais das operações de ordenamento e pesquisa de catálogos fogem do marco deste capítulo, embora sejam da maior importância nos algoritmos de análise.

Naturalmente, o subcatálogo deve ser também ordenado. Observa-se que o que acontece para um subcatálogo.

$$c'' = \begin{array}{|c|} \hline 3 \\ \hline 5 \\ \hline \end{array}$$

$$(c^{-1})_{c''} = \begin{array}{|c|} \hline 4 \\ \hline 3 \\ \hline \end{array}$$

não é ordenado e portanto o seu complemento não existe. Entretanto a inversa de \underline{c}_R é:

$$\underline{d}_R = (\underline{c}_R^{-1})c'' = \begin{array}{|c|c|} \hline 4 & 3 \\ \hline 3 & 5 \\ \hline \end{array}$$

e o seu complemento

$$\bar{\underline{d}}_R = \begin{array}{|c|c|} \hline 2 & 2 \\ \hline 5 & 7 \\ \hline 1 & 9 \\ \hline \end{array}$$

Os índices matriciais figuram agora explicitamente em todos os catálogos, duplicando a memória necessária. Em compensação, os cálculos são mais rápidos e simples.

A escolha de Z pelos novos catálogos, requer a procura dos índices de Z que figuram na coluna esquerda de cada um deles, isto é, os índices 4,3 de fila e 2,5,1 de coluna. O resultado é

$$Z_{\underline{d}_R \bar{\underline{d}}_R} = \begin{array}{c} \phantom{Z_{\underline{d}_R \bar{\underline{d}}_R}} \\ \phantom{Z_{\underline{d}_R \bar{\underline{d}}_R}} \\ \phantom{Z_{\underline{d}_R \bar{\underline{d}}_R}} \end{array} \begin{array}{ccc} & 2 & 5 & 1 \\ 4 & 3,2 & 3,5 & 3,9 \\ 3 & 5,2 & 5,7 & 5,9 \end{array}$$

Para procurar uma impedância qualquer, busca-se associativamente na coluna direita, respeito aos índices do array (e não da coluna esquerda). Assim, 3 ocupa coluna 1 em \underline{d}_R e 7 a 2 em $\bar{\underline{d}}_R$. Portanto, a impedância 3-7 está na fila 1, coluna 2 de $Z_{\underline{d}_R \bar{\underline{d}}_R}$. Note-se que as colunas esquerdas serviram para o cálculo de $Z_{\underline{d}_R \bar{\underline{d}}_R}$, mas não são mais necessárias para a manipulação posterior de $Z_{\underline{d}_R \bar{\underline{d}}_R}$.

Autores do Artigo:

Hector Arango

Edison Oliveira de Jesus