

TESE  
95



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



CÁLCULO DE CONTINGÊNCIAS ATRAVÉS  
DA MATRIZ Z - BARRA

Autor: Eng.º MARCOS ALMEIDA PRADO LEFÉVRE

Orientador: Prof. HOMER ELIOT BROWN

- 1975 -

AGRADECIMENTO

*Ao Professor Brown, pelo incentivo e  
apoio na realização deste trabalho.*

## SUMÁRIO (Resumo)

Nas últimas duas décadas foram desenvolvidos ótimos programas de resolução de fluxos de potência por diferentes métodos. Devido ao aumento do número de interligações entre sistemas, além de seus crescimentos naturais, tais programas têm consumido um grande tempo computacional além de requererem grande área de memória. Tem-se, então, pesquisado métodos simplificados mais rápidos e com menor utilização de memória.

Neste trabalho, será apresentado o método de cálculo de contingências através da matriz Z-Barra desenvolvido por Homer E. Brown, resultados de casos teste e suas comparações com os resultados obtidos por fluxos de potência.

# I N D I C E

	Pág.
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - MATRIZ Z-BARRA	6
2.1 - Definições	6
2.2 - Algoritmo de Construção	7
2.3 - Reordenação das Linhas	11
2.4 - Eliminação de Eixos e Rotina de Ordenação Modificada	13
2.5 - Programa Utilizado	15
3 - MÉTODO DE CÁLCULO DE CONTINGÊNCIAS	18
3.1 - Generalidades	18
3.2 - Contingência Simples	19
3.3 - Contingência Múltipla	22
3.4 - Contingência Causada por Adição de Linha	26
3.5 - Cálculo das Tensões	28
3.6 - Programa Utilizado	30
4 - RESULTADOS	34
4.1 - Sistema Utilizado	34
4.2 - Desenvolvimento do Estudo	34
4.3 - Apresentação dos Resultados	35
4.4 - Análise dos Resultados	47
5 - APLICAÇÕES DO MÉTODO	49
5.1 - Off-Line	49
5.2 - On-Line	49
6 - CONCLUSÕES	51
BIBLIOGRAFIA	52
ANEXO I - DIAGRAMA UNIFILAR, DADOS DO SISTEMA	
ANEXO II - LISTAGEM DO PROGRAMA Z-BARRA	
ANEXO III - LISTAGEM DO PROGRAMA DE CÁLCULO DE CONTINGÊNCIAS	



## i - INTRODUÇÃO

Até 1955 as soluções de problemas envolvendo *networks* elétricos eram obtidas por cálculos manuais trabalhosos ou usando *networks calculators*. Este nada mais era do que a representação do sistema real em uma escala grandemente reduzida. O desenvolvimento das segunda e terceira gerações de computadores digitais, permitiu o estudo de grandes *networks* utilizando métodos matriciais. A versatilidade dos computadores digitais, somada a sua grande capacidade e disponibilidade quase universal, fez com que os *networks calculators* se tornassem obsoletos para estudos de sistemas elétricos.

Inicialmente, utilizou-se o computador digital na resolução de problemas de fluxo de potência, fazendo-se programas que simplesmente automatizavam o método manual. Posteriormente foi mudada a filosofia, procurando-se efetuar programas já explorando as qualidades dos computadores. Neste sentido, o primeiro programa de fluxo de potência que realmente fez sucesso foi o desenvolvido por Ward and Hale em 1956 [3]. Tal programa utilizava a formulação nodal do problema (Y-Barra) e resolvia as equações quadráticas que descreviam o *network* por um método iterativo de Newton, modificado [4]. Os programas que se seguiram utilizavam o algoritmo iterativo de Gauss-Seidel.

No método iterativo de Gauss-Seidel temos; tanto o número de iterações necessárias para a convergência, como o tempo de cada iteração, proporcionais ao tamanho do sistema. O crescimento das interligações entre sistemas além do crescimento natural de cada sistema, fez com que se procurassem outros métodos iterativos de solução. (No Brasil, a utilização de programas de fluxo de potência utilizando o algoritmo de Gauss-Seidel encontra defensores, principalmente, entre os que trabalham em planejamento, devido a relativa pouca memória requerida, o que traz algumas vantagens práticas, e a maior independência em relação aos valores iniciais).

Um método de cálculo de fluxo de potência de muito sucesso resultou de vários anos de pesquisa efetuada

pela Bonneville Power Administration [5-8]. Este método utiliza o algoritmo iterativo de Newton-Raphson para a solução simultânea das equações quadráticas que descrevem o sistema de potência. A grande vantagem deste método sobre o anterior é que o número de iterações necessárias para a convergência é praticamente independente do tamanho do sistema; a dependência estaria só no tempo de cada iteração, de forma que a utilização deste algoritmo faz com que o tempo de convergência de um caso seja bem menor.

O uso da matriz Jacobiana no método de Newton requer uma porção de memória muito maior, mesmo aproveitando ao máximo a esparsidade desta matriz, do que a requerida no método de Gauss-Seidel, porém, a técnica de Newton-Raphson tem tido tanto sucesso que a maioria dos programas atuais usam este algoritmo.

Como exemplo, temos a comparação tempo x memória de casos rodados num computador IBM/370, com um sistema de aproximadamente 500 barras e 950 linhas, em ambos os métodos.

Algoritmo	Tempo total	Memória requerida
Gauss-Seidel	≅ 45'	120 K
Newton-Raphson	≅ 3'	270 K

Outro algoritmo recentemente desenvolvido, que apresenta boas características de convergência, é o método da matriz Z-Barra [9]. Sua desvantagem é requerer uma memória muito grande no computador; já que a matriz Z-Barra é cheia e não esparsa como as matrizes Y-Barra e Jacobiana. Contudo, recorrendo a técnica de *diakoptics*, grandes sistemas podem ser resolvidos utilizando este método.

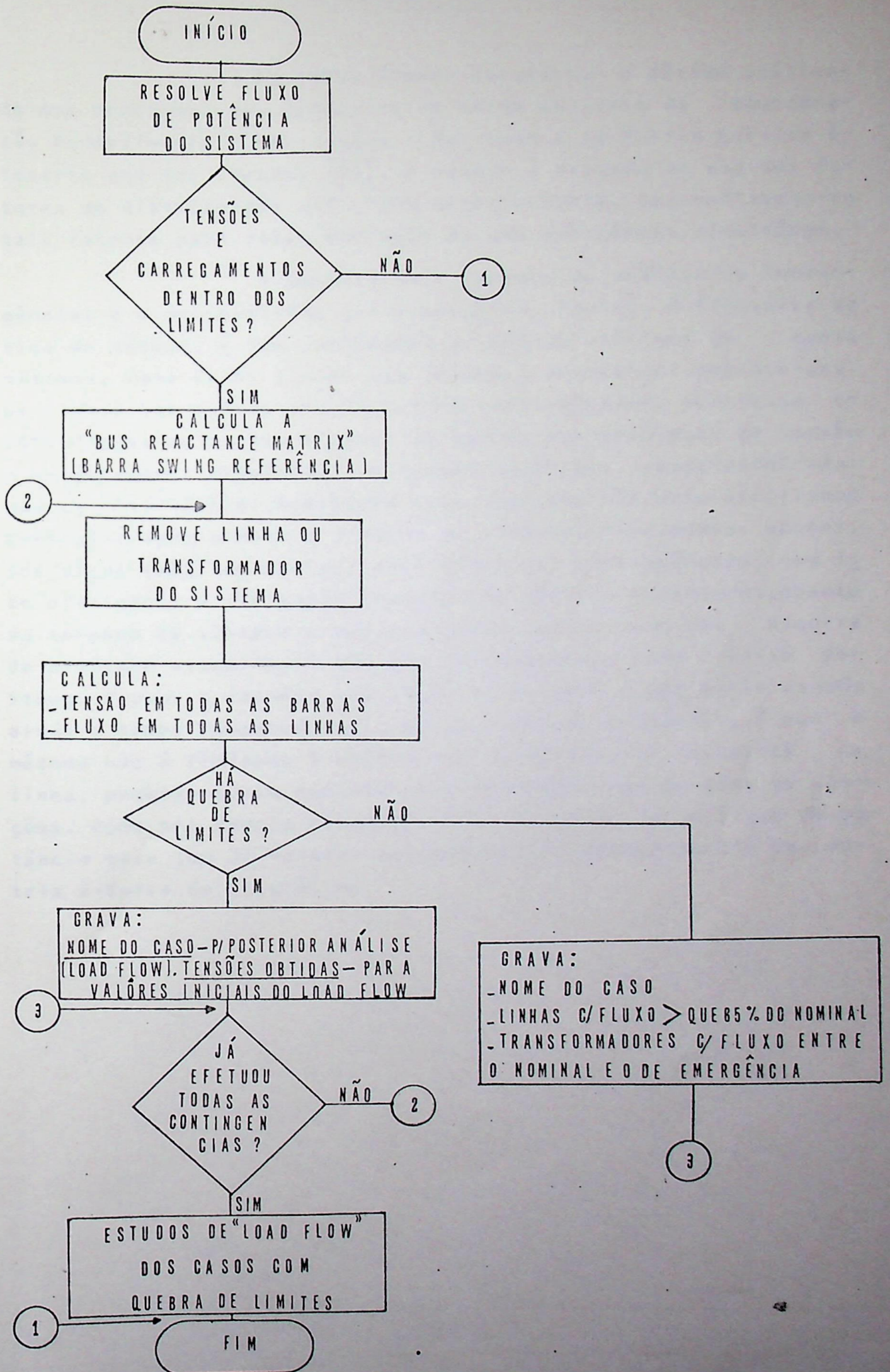
Do exposto anteriormente, observamos que já contávamos há algum tempo com diversos bons métodos de resolução de problemas de fluxo de potência. Contudo, a utilização destes métodos em estudos de planejamento de grandes sistemas e em monitoração *on-line* em tempo real feita em computadores de centros de despacho de carga, onde um número muito grande de casos é necessário, não é adequada devido ao tempo necessário à resolução de cada caso. Portanto, investigações vem sendo feitas para obterem-se métodos aproximados mais rápidos, que forneçam precisão suficiente.

A primeira investigação do problema, foi realizada por MacArthur [10] num estudo conjunto da Interconexão Pennsylvania - New Jersey - Maryland, para determinação de seus limites de transmissão. De estudos de fluxo de potência anteriores, sabia-se que os limites de transmissão eram fixados pela capacidade térmica. Devido a complexidade do sistema envolvido, era impraticável estudar todas as possibilidades através de fluxos de potência. Desenvolveu-se, então, um método baseado no princípio de superposição, criando-se termos denominados fatores de distribuição. Foram convencionados dois tipos de fatores:

- *generator distribution factor*, posteriormente [11] denominado *generation shift distribution factor*  $G_{ag}$ , que é definido como o acréscimo no carregamento da linha  $a$ , entre as barras  $r$  e  $s$ , se a geração no nó  $g$  é acrescida de uma unidade e a geração na barra de referência (barra escolhida como referência na construção da matriz Z-Barra - normalmente a barra *swing*), diminuída de uma unidade.
- fator de distribuição devido a saída de circuitos, denominado posteriormente [11] *line outage distribution factor* -  $L_{ab}$ , definido como o acréscimo de fluxo numa linha  $a$ , entre as barras  $r$  e  $s$ , se a linha  $b$ , entre as barras  $p$  e  $q$ , que estava com corrente (potência) unitária, é removida.

Tais fatores, calculados a partir de elementos da matriz Z-Barra (ou X-Barra no caso de não representarmos resistência), permitiriam o cálculo, com boa precisão, do fluxo em qualquer linha; conhecido o *shift* de geração ou a corrente na linha removida e a corrente inicial da linha onde se deseja verificar o carregamento (obtida através do fluxo de potência - caso base - regime normal).

Stagg e El-Abiad apresentaram um método [12] também utilizando a matriz Z-Barra (X-Barra) e o princípio de superposição, para aplicação em estudos de planejamento. O método se baseia na simulação da saída de cada linha por uma dupla injeção de corrente em seus terminais. Determina-se, então, a queda de tensão em cada barra e conhecidas estas quedas e as impedâncias das linhas, calculam-se os novos fluxos. Deve-se observar que os resultados são obtidos, como no caso anterior, a partir de um caso base convergido. Foi sugerido, pelos autores, sua utilização, conforme o fluxograma a seguir.



Em 1969, Limmer apresentou o método utilizado nos programas dos despachos de carga centrais da Interconexão Pennsylvania - New Jersey - Maryland e da Public Service Electric and Gas Company [11]. O método é baseado no uso dos fatores de distribuição definidos anteriormente, generalizando-se tais fatores para casos com mais de uma emergência simultânea.

A maneira mais recente de análise de contingências é a desenvolvida por Brown [1-2, 13-14]. A filosofia básica do método, é que conhecemos os pontos críticos do nosso sistema, isto é, as linhas que tendem a apresentar sobrecargas, as linhas que quando envolvidas em contingências, acarretam em sobrecargas de outras linhas, as barras com problemas de tensão e os geradores envolvidos na determinação das capacidades máximas de intercâmbio. Aceitando esta hipótese não mais precisamos armazenar toda a matriz Z-Barra do sistema. Precisamos, apenas, dos eixos (nós) da matriz, envolvidos nas contingências; com isto eliminamos a limitação imposta nos métodos anteriores, quanto ao tamanho do sistema a ser analisado. Outro fato que decorre da hipótese assumida, é que não calcularemos, como é feito por Stagg, fluxos e tensões em todas as linhas; o que minimiza mais ainda o tempo computacional. Outra vantagem adicional, é que o método não é limitado à análise de contingências de perdas de linha, podendo serem consideradas contingências devidas às adições. Como nos demais métodos, iremos precisar de um fluxo de potência base (ou de valores telemididos) e dos elementos da matriz Z-Barra de interesse.

## 2 - MATRIZ Z-BARRA

### 2.1 - Definições

Apesar da definição, construção e utilização da matriz Z-Barra ser inteiramente coberta pelos textos na lista de referências [1-2, 15-16], achei conveniente resumir, neste item, o que deve ser conhecido para o completo entendimento do método de cálculo de contingências a ser descrito posteriormente.

A matriz Z-Barra contém, basicamente, dois tipos de impedâncias em relação a uma referência arbitrariamente escolhida; as *driving-point impedances* e as *transfer impedances*. As *driving-point impedances* -  $Z_{ii}$  são elementos da diagonal principal da matriz e representam a tensão que teríamos na barra  $i$ , em relação a referência, se injetarmos uma corrente unitária neste nó, ou seja, a *driving-point impedance* do nó  $i$  na da mais é do que a impedância equivalente entre este nó e a referência. As *transfer impedances* -  $Z_{ij}$  ( $i \neq j$ ), são os elementos fora da diagonal principal da matriz e representam a tensão que teríamos na barra  $i$ , em relação a referência, se injetarmos uma corrente unitária na barra  $j$ .

A equação matricial, que relaciona a matriz Z-Barra, as correntes injetadas nos nós, e as tensões dos nós é:

$$[Z] [I] = [E] \quad (2.1)$$

Desenvolvendo a equação matricial (2.1), para um sistema de  $n$  barras (mais a barra de referência) e supondo uma corrente única unitária injetada na barra  $k$ , as definições anteriores mostram-se evidentes por si próprias.

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2k} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & & & & & \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & & & & & \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1.0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_k \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

logo:

$$E_k = Z_{kk}$$

$$E_i = Z_{ik}, \quad i=1, \dots, n$$

$$i \neq k$$

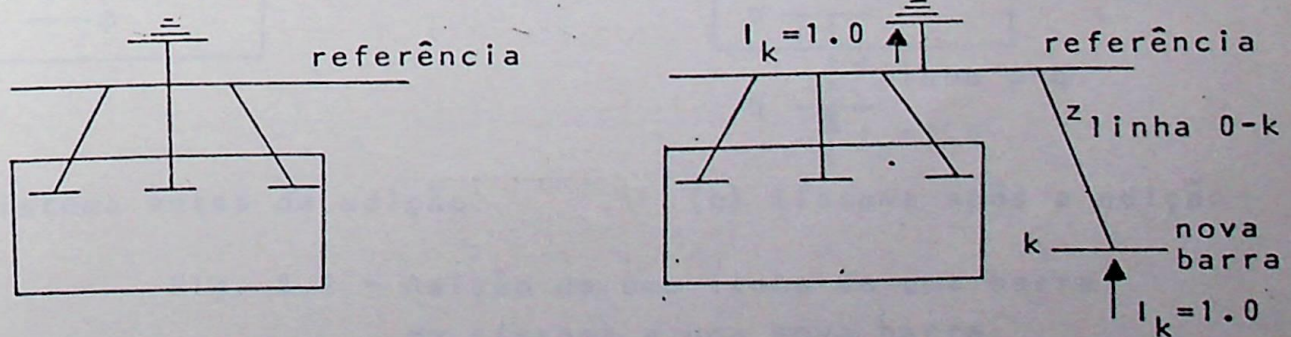
## 2.2 - Algoritmo de Construção

Conhecido o fato de que Y-Barra é a matriz inversa de Z-Barra, poderíamos pensar em obter Z-Barra, construindo Y-Barra e efetuando a inversão matricial. A aparente vantagem deste procedimento, devido a simplicidade de formação de Y-Barra, cai por terra, já que é impraticável a inversão de uma matriz de um grande sistema, mesmo utilizando métodos sofisticados de inversão, como o de Shipley [1].

É impossível o cômputo direto da matriz Z-Barra a partir de um sistema de transmissão completo; entretanto, é possível efetuar-se, de maneira simples, a modificação da matriz Z-Barra de um sistema para a adição de uma única linha. Desta forma, um algoritmo foi desenvolvido para construir-se passo a passo, a matriz Z-Barra, partindo-se da primeira linha conectada a referência, adicionando uma linha de cada vez e fazendo as modificações convenientes na matriz.

Basicamente, devemos ter três tipos diferentes de rotinas de modificação da matriz Z-Barra, pela adição de uma linha ao sistema, dependendo do tipo de linha adicionada.

a) Linha da referência a uma nova barra



(a) Sistema antes da adição

(b) Sistema após a adição

Fig. 2.1 - Adição de uma linha da referência a uma nova barra

Observamos na figura 2.1(b), representativa do sistema após a adição, que a injeção de corrente na barra  $k$  não produz tensão nas demais barras do sistema (não há corrente entre estas barras e a referência). Da mesma forma, a injeção de corrente em qualquer outra barra do sistema não produzirá tensão na barra  $k$ .

$$Z_{ik} = Z_{ki} = 0 \quad i \neq k \quad (2.3)$$

Da mesma figura observamos que com corrente unitária injetada na barra  $k$ , a tensão desta barra em relação a referência, será:

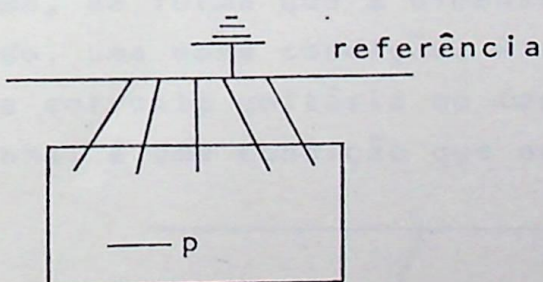
$$I_k \times z_{\text{linha } 0-k} = 1.0 \times z_{\text{linha } 0-k} = z_{\text{linha } 0-k} \quad (2.4)$$

logo:

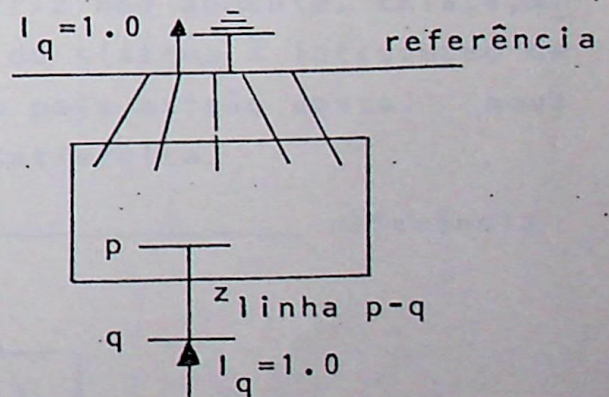
$$Z_{kk} = z_{\text{linha } 0-k} \quad (2.5)$$

Assim, a adição de uma linha radial da referência a uma nova barra, aumenta a matriz de uma linha e uma coluna de zeros. O elemento da diagonal principal correspondente a este novo eixo (nó) da matriz é igual a impedância da nova linha adicionada.

b) Linha de uma barra do sistema a uma nova barra



(a) Sistema antes da adição



(b) Sistema após a adição

Fig. 2.2 - Adição de uma linha de uma barra do sistema a uma nova barra

Observamos na figura 2.2(b), representativa do sistema após a adição da linha  $pq$ , que a injeção da corrente unitária em  $q$ , produz tensões nas demais barras do sistema

idênticas as produzidas pela injeção da mesma corrente unitária em p. Da mesma forma, injetando corrente unitária em qualquer barra, que já estivesse no sistema, teremos tensão em q igual a tensão em p (não haveria circulação de corrente entre p e q), logo:

$$\begin{aligned} Z_{qk} &= Z_{pk} \\ Z_{kq} &= Z_{kp} \end{aligned} \quad k \neq q \quad (2.6)$$

Notamos também, que a *driving-point impedance* da linha q é igual a *driving-point impedance* da barra p somada a impedância da linha adicionada, .∴.

$$Z_{qq} = Z_{pp} + z_{\text{linha p-q}} \quad (2.7)$$

Portanto, a inclusão desta nova barra, acarreta no aumento de uma linha e uma coluna, da matriz Z-Barra. Os elementos fora da diagonal principal deste novo eixo, serão iguais aos elementos da linha e coluna correspondente à barra p. O elemento da diagonal principal é obtido pela equação (2.7).

### c) Linha entre duas barras do sistema

Tal adição não acrescenta um novo nó ao sistema, de forma que a dimensão da matriz não aumenta. Existe, contudo, uma nova condição. A resposta do sistema à introdução de uma corrente unitária no *loop* criado pela adição desta nova linha, é uma condição que deve ser satisfeita.

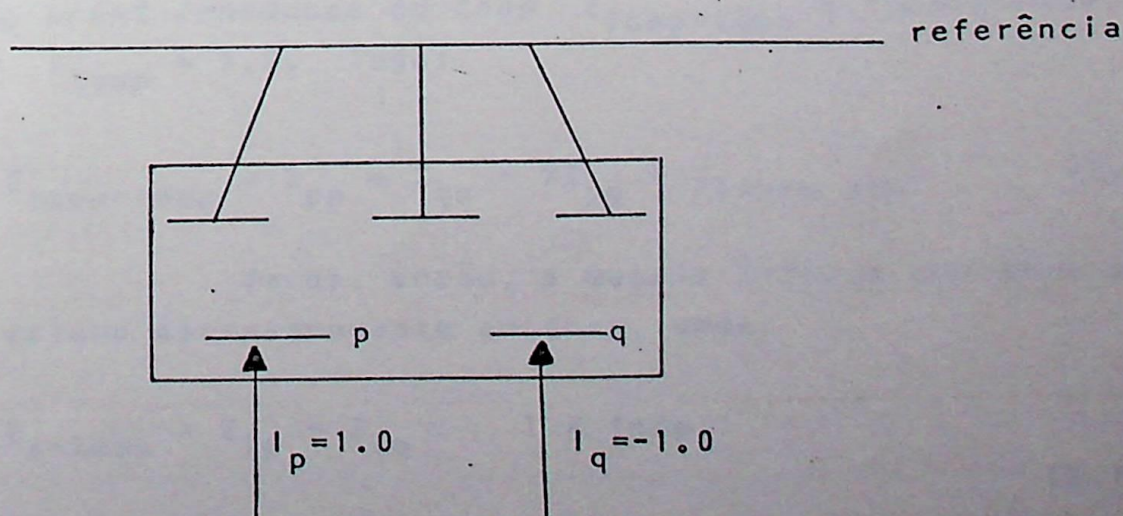


Fig. 2.3 - Simulação da adição de linha por duas injeções de corrente

A injeção de uma corrente unitária na barra  $p$ , provoca tensões em todas as barras do sistema, iguais aos elementos da coluna  $p$  da matriz Z-Barra. A injeção de corrente  $-1.0$  na barra  $q$ , produz tensões nas barras do sistema iguais aos elementos da coluna  $q$  da matriz Z-Barra, porém, com o sinal trocado. Portanto, as tensões que aparecem nas barras do sistema são as diferenças das colunas correspondentes as barras  $p$  e  $q$  da matriz Z-Barra.

A quantidade de tensão, que deve ser introduzida no *loop* para causar circulação de corrente unitária pode ser calculada.

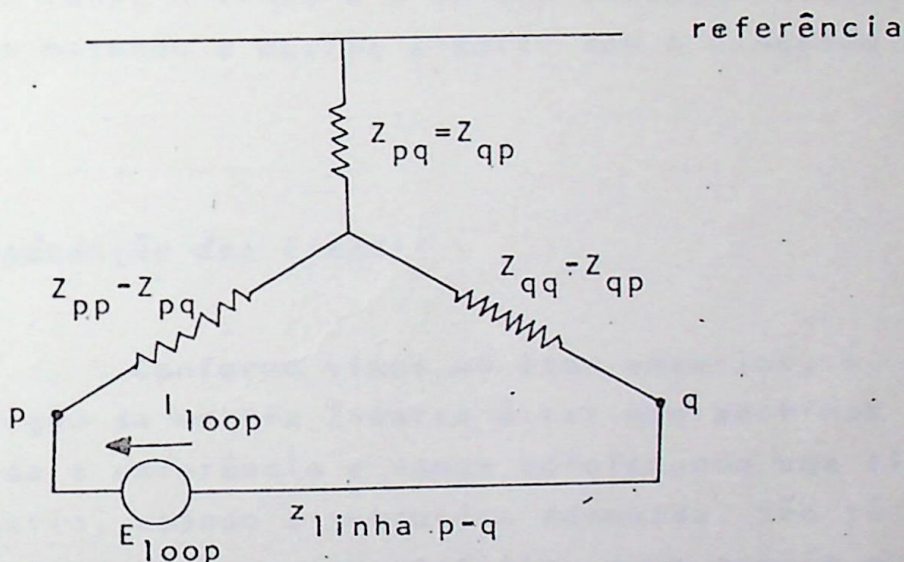


Fig. 2.4 - Determinação da *driving-point impedance* do *loop*

$$E_{loop} = i_{loop} (Z_{pp} + Z_{qq} - Z_{pq} - Z_{qp} + z_{linha\ p-q}) \quad (2.8)$$

a *driving-point impedance* do *loop*  $Z_{loop-loop}$  é determinada, fazendo-se  $i_{loop} = 1.0$ , logo:

$$Z_{loop-loop} = Z_{pp} + Z_{qq} - 2Z_{pq} + z_{linha\ p-q} \quad (2.9)$$

Temos, então, a matriz Z-Barra com mais uma linha e coluna correspondente ao *loop*, onde:

$$\begin{aligned} Z_{i-loop} &= Z_{ip} - Z_{iq} & i \neq loop \\ Z_{loop-i} &= Z_{pi} - Z_{qi} & i \neq loop \end{aligned} \quad (2.10)$$

O elemento da diagonal principal, deste novo eixo, pode ser obtido por (2.9). Este novo eixo da matriz Z-Barra correspondendo ao *loop*, é eliminado da matriz por uma redução de Kron [1], usando a equação:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \left( \frac{Z_{i-loop} \times Z_{loop-j}}{Z_{loop-loop}} \right) \quad \begin{array}{l} i \neq \text{loop} \\ j \neq \text{loop} \end{array} \quad (2.11)$$

Teremos, então, a modificação de todos os elementos da matriz Z-Barra, com exceção daqueles no eixo correspondente ao *loop*. A linha e a coluna correspondentes ao *loop* são eliminadas mantendo a matriz Z-Barra com a dimensão original.

### 2.3 - Reordenação das Linhas

Conforme vimos no item anterior, o algoritmo de construção da matriz Z-Barra é tal que partimos de uma barra conectada a referência e vamos adicionando uma linha de cada vez à matriz, usando a subrotina adequada. Não só esta condição de partida deve ser satisfeita, como também a de que toda a linha a ser adicionada deve se enquadrar numa das três classificações vistas anteriormente. Não teria sentido, por exemplo, quereremos adicionar uma linha entre os terminais p e q sendo p e q barras ainda não consideradas na matriz.

Foi desenvolvida uma rotina de arrumação de uma lista randômicas de linhas em uma ordem tal, que tornasse possível a formação da matriz Z-Barra, utilizando-se o algoritmo mostrado em 2.2. Desta forma, o arranjo dos dados de linha numa sequência que permitisse o bom funcionamento do algoritmo de construção, deixa de ser uma preocupação.

A rotina de ordenação das linhas segue os seguintes passos:

- a. examina-se a lista randômica de linhas, procurando-se a primeira barra conectada à referência. A primeira destas linhas encontrada é transferida à lista ordenada de linhas. O outro nó terminal desta linha determina o primeiro eixo da matriz e a primeira barra da lista de barras.

- b. As linhas da lista randômica são examinadas e aquelas barras conectadas diretamente a primeira barra da lista de barras são também adicionadas a aquela lista.
- c. Passa-se a barra seguinte da lista de barras. Examina-se todas as linhas da lista desordenada para verificar se estão conectadas a esta barra.
- linhas conectadas entre esta barra e a referência, são adicionadas à lista ordenada de linhas
  - linhas entre esta barra e barras precedentes a ela na lista de barras, são adicionadas a lista ordenada
  - linhas entre esta barra e barras posteriores a ela na lista de barras são *by-passadas* para posterior processamento.
  - barras são adicionadas a lista de barras naquelas linhas entre a barra que está sendo processada e barras que ainda não estão na lista. Tais linhas permanecem, por enquanto, na lista randômica.
- d. Após o exame de todas as linhas da lista randômica voltamos ao *step* c e repetimos o processo.

Exemplos da utilização desta rotina são encontrados em [1].

No caso do sistema que vem sendo estudado, ser composto de diversas áreas desconectadas, (como as representadas pelas letras A, B e C, na figura 2.5)

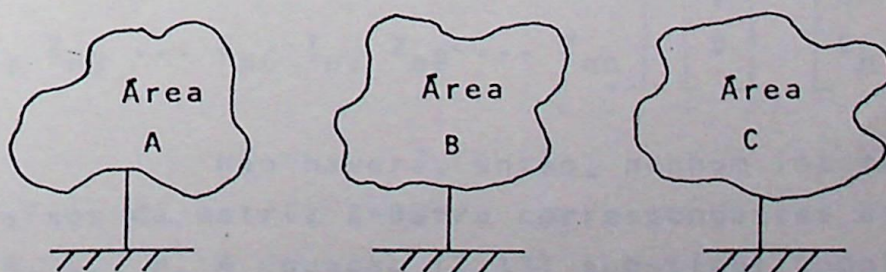


Fig. 2.5 - Sistema composto por áreas desconectadas

Linhas permanecerão na lista randômica de linhas após o processamento da última barra da lista de barras

ras. As linhas que permaneceram na lista randômica devem ser examinadas, procurando-se outra barra conectada a referência. Encontrada tal barra, acrescentamo-la à lista de barras e a linha à lista ordenada, voltamos, então a C e partimos novamente o processo.

#### 2.4 - Eliminação de Eixos e Rotina de Ordenação Modificada

Como será visto, posteriormente, no item que descreve o método de cálculo de contingências usando a matriz Z-Barra, as contingências serão simuladas por injeções de correntes em barras adequadas. Em outras barras, desejaremos ou precisaremos obter as tensões originadas por estas injeções de corrente. Observemos a equação (2.12) abaixo, para um sistema de  $n$  barras, e suponhamos saber que vamos injetar correntes nas barras 2 e 3, e que poderemos precisar das tensões nas barras 6 e 8.

$$\begin{array}{cccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & \dots & 6 & 7 & 8 & \dots & n \\
 1 & \left[ \begin{array}{cccccccc}
 Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{16} & Z_{17} & Z_{18} & \dots & Z_{1n} \\
 Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{26} & Z_{27} & Z_{28} & \dots & Z_{2n} \\
 Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \dots & Z_{36} & Z_{37} & Z_{38} & \dots & Z_{3n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & \dots & Z_{66} & Z_{67} & Z_{68} & \dots & Z_{6n} \\
 Z_{71} & Z_{72} & Z_{73} & \dots & Z_{76} & Z_{77} & Z_{78} & \dots & Z_{7n} \\
 Z_{81} & Z_{82} & Z_{83} & \dots & Z_{86} & Z_{87} & Z_{88} & \dots & Z_{8n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \dots & Z_{n6} & Z_{n7} & Z_{n8} & \dots & Z_{nn}
 \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c}
 0 \\
 I_2 \\
 I_3 \\
 \vdots \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \vdots \\
 0
 \end{array} \right] & = & \left[ \begin{array}{c}
 E_1 \\
 E_2 \\
 E_3 \\
 \vdots \\
 E_6 \\
 E_7 \\
 E_8 \\
 \vdots \\
 E_n
 \end{array} \right] & (2.12)
 \end{array}$$

Não haverá, então, nenhum interesse em armazenar os eixos da matriz Z-Barra correspondentes as barras 1, 4, 5, 7, 9, ...  $n$ . A equação (2.13) substitui completamente a equação anterior e implica em necessidade de memória computacional muito menor.

$$\begin{array}{c}
 2 \quad 3 \quad 6 \quad 8 \\
 \begin{array}{c}
 2 \\
 3 \\
 6 \\
 8
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 Z_{22} & Z_{23} & Z_{26} & Z_{28} \\
 Z_{32} & Z_{33} & Z_{36} & Z_{38} \\
 Z_{62} & Z_{63} & Z_{66} & Z_{68} \\
 Z_{82} & Z_{83} & Z_{86} & Z_{88}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 I_2 \\
 I_3 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 E_2 \\
 E_3 \\
 E_6 \\
 E_8
 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \quad (2.13)$$

Esta é, justamente, uma das principais vantagens deste método sobre os demais. Devemos, portanto, alterar nosso algoritmo de formação da matriz Z-Barra, de forma a só mantermos os eixos correspondentes as barras que desejamos. A modificação a ser feita, pode ser melhor entendida com o auxílio da Figura 2.6, onde as áreas A e B formam um sistema, e só queremos manter os eixos correspondentes as barras da área A.

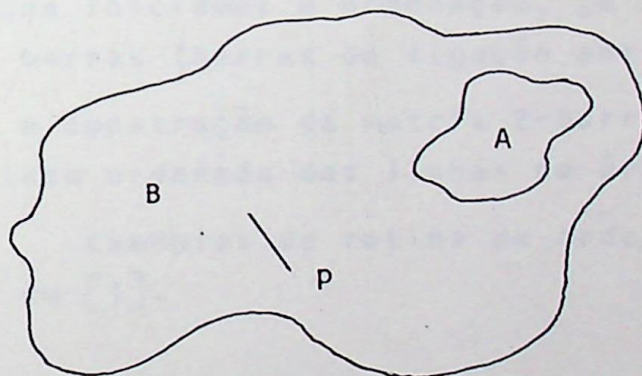


Fig. 2.6 - Sistema onde A é a área de interesse

Imaginemos uma barra p, na área B. Após computarmos todas as linhas conectadas a barra p, não precisamos mais manter este eixo na matriz Z-Barra, já que os elementos da linha e coluna correspondentes a esta barra, sofrerão modificações com a adição de novas linhas; porém, estas não afetam elementos em outros eixos da matriz. Portanto, assim que acabarmos de computar todas as linhas conectadas a uma barra fora da área de interesse, o eixo da matriz Z-Barra correspondente a esta barra deve ser eliminado.

A sequência abaixo, sumariza o procedimento a ser adotado, na obtenção da matriz Z-Barra da área de interesse, fornecidas a lista de linhas do sistema e a lista das barras pertencentes a área em estudo (Área A).

- a. Formam-se duas filas distintas para as linhas, uma contendo as linhas da área de interesse e outra com as linhas da área externa.
- b. A fila de linhas correspondente as linhas fora da área de interesse, é ordenada pela rotina descrita anteriormente.
- c. Inicia-se a construção da matriz Z-Barra para a área externa. Assim que uma linha é adicionada, verifica-se se alguma das barras terminais desta linha está na área externa e não possui novas ligações. Sempre que isto ocorrer, eliminam-se os eixos desnecessários.
- d. Após o cômputo de todas as linhas da área externa, devemos iniciar a ordenação das linhas da área de interesse. A única diferença sobre a rotina de ordenação anterior, é que iniciamos a ordenação, já com elementos na lista de barras (barras de ligação entre as áreas).
- e. Voltamos a construção da matriz Z-Barra, agora, a partir da lista ordenada das linhas da área de interesse.

Exemplos da rotina de ordenação modificada, são encontrados em [1].

## 2.5 - Programa Utilizado

Com base no exposto nos itens anteriores, foi elaborado um programa em linguagem FORTRAN de construção da matriz Z-Barra. Como dados de entrada, teremos os dados das barras da área de interesse, e das linhas das áreas de interesse e externa. Como dados da barra, devemos ter:

- número
- magnitude da tensão em p.u. (a partir do caso base)
- fase da tensão em graus (a partir do caso base)

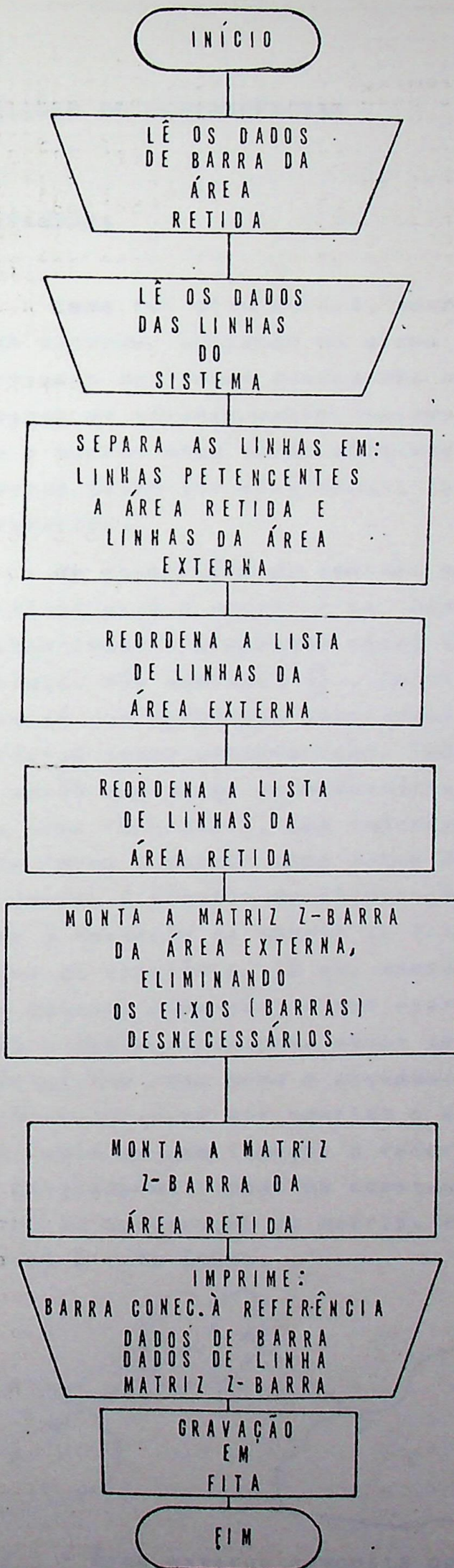
Como dados de linha devemos ter:

- número das barras terminais
- impedância em p.u.
- admitância em p.u.
- capacidade máxima de corrente em p.u.

Deve-se notar que a presença das tensões das

barras, das admitâncias e capacidades máximas de corrente das linhas, é devido a necessidade de tais valores no método de cálculo de contingências, conforme será visto posteriormente.

O fluxograma apresentado a seguir mostra, de forma resumida, os passos do programa elaborado. (As listagens com os resultados obtidos com tal programa poderão ser encontradas no anexo II).



### 3 - MÉTODO DE CÁLCULO DE CONTINGÊNCIAS

#### 3.1 - Generalidades

Como foi dito em 2.4, deve-se construir a matriz Z-Barra do sistema, mantendo os eixos de interesse, isto é; barras terminais de linhas envolvidas em remoções, adições ou verificações de carregamentos, barras onde deseja-se obter as tensões e barras onde serão alteradas as gerações. Todas as demais barras devem ser eliminadas, de forma a minimizar a memória requerida.

Na construção da matriz, podem-se considerar impedâncias fixas para a terra: - os *line charging*, capacitores ou reatores *shunt* e elementos *shunt* devidos a transformadores de relação não nominal [3]. Contudo, isto não é feito normalmente já que pesquisas anteriores [14] mostraram, que não há benefícios nesta consideração. Todas as ligações à terra tornam-se então uma carga desnecessária. Como desejamos utilizar a terra como referência, uma impedância arbitrária à terra é tomada de forma a servir como ponto de partida à formação da matriz Z-Barra. A técnica de eliminação de eixos é mais eficiente, quando a formação da matriz se inicia a um ponto bem remoto da área de interesse, já que mantém-se por mais tempo uma matriz de pequena dimensão; o que acarreta em menor número de operações e conseqüentemente menor tempo computacional. Pode ser necessário, num caso como o esquematizado na figura 3.1, onde A é a área que deve ser mantida e B e C são áreas a serem eliminadas, mais de uma ligação à referência. Neste caso, a lógica do programa utilizado na construção deve ser tal, que após o término da construção da matriz, elimine-se as ligações desnecessárias à referência.

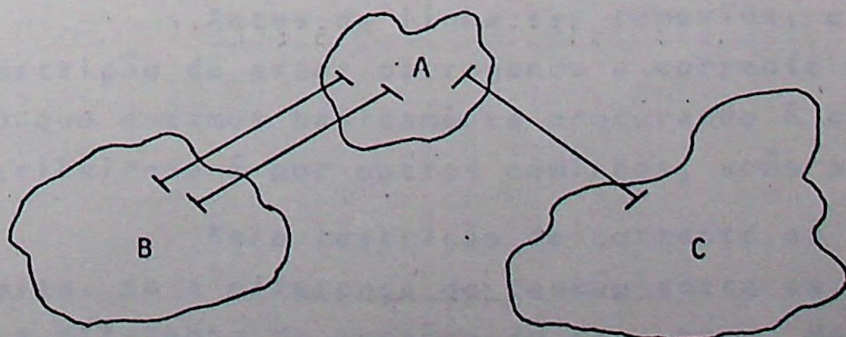


Fig. 3.1 - Área externa composta por B e C

O valor de impedância, normalmente adotado para a ligação fictícia à terra é  $1.0 + j1.0$ , por razões numéricas (maior precisão). Conforme a discussão encontrada em [14], nota-se que um valor adequado seria pouco superior aos valores de impedância do sistema estudado.

### 3.2 - Contingência Simples

Na aplicação do método, far-se-á necessário o conhecimento dos dados das linhas do sistema e de um caso base de fluxo de potência. Como caso base deve ser entendido um conjunto de tensões (módulo e fase) para as barras do sistema. Tais resultados podem ser obtidos a partir do processamento de um fluxo de potência por um dos métodos tradicionais citados anteriormente, ou por valores telemididos no caso de aplicação *on-line*. Será também necessário dispor-se da matriz Z-Barra da área de interesse.

Imaginemos agora, uma contingência simples como a remoção da linha a-b do sistema da figura 3.2

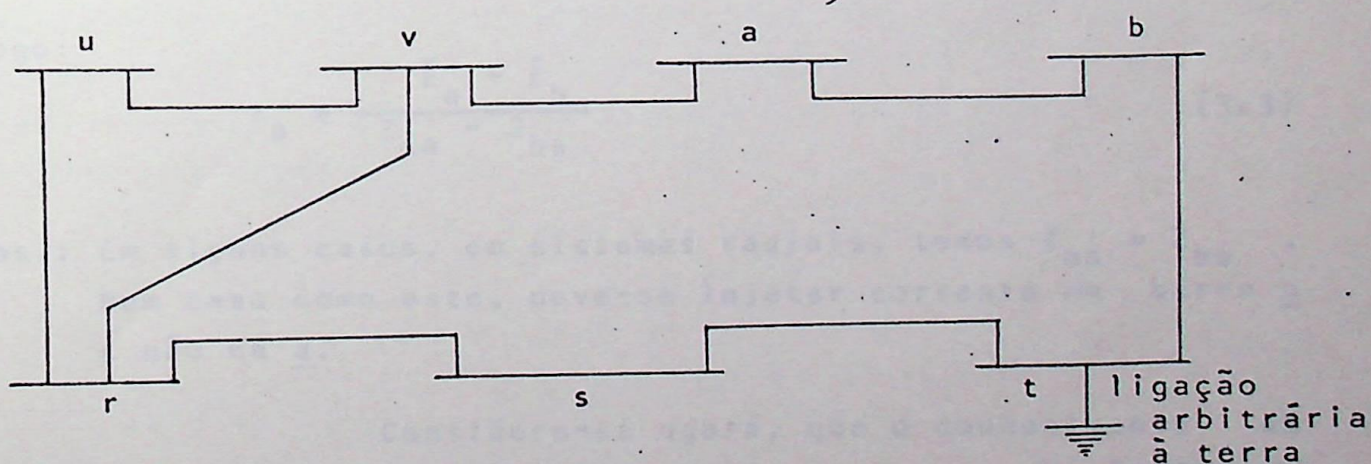


Fig. 3.2 - Sistema de transmissão com uma única ligação arbitrária à referência

Antes da linha ser removida, ela deve satisfazer a restrição de estar carregando a corrente obtida do caso base. O que estamos basicamente procurando é como esta corrente distribuir-se-á por outros caminhos, após a remoção.

Esta restrição de corrente na linha a-b será satisfeita, se a diferença de tensão entre as barras a e b for igual a diferença de tensões do caso base. Para isto, deve

mos injetar uma corrente de valor apropriado, em uma das duas barras terminais da linha a-b. (Na verdade, pode-se injetar corrente em qualquer barra do sistema, desde que a restrição sobre a corrente na linha seja atendida).

Com uma só corrente injetada na barra a, por exemplo, teremos as tensões nas barras a e b relacionadas com esta corrente através das definições de impedâncias de *driving point* e de transferência, ou seja:

$$\bar{E}_a = Z_{aa} I_a \quad (3.1)$$

$$\bar{E}_b = Z_{ba} I_a$$

$\bar{E}_a$  e  $\bar{E}_b$  são tensões obtidas do caso base.

Para que a restrição, quanto ao valor da corrente fluindo na linha a ser removida seja satisfeita, devemos ter:

$$(\bar{E}_a - \bar{E}_b) = (Z_{aa} - Z_{ba}) I_a \quad (3.2)$$

logo:

$$I_a = \frac{\bar{E}_a - \bar{E}_b}{Z_{aa} - Z_{ba}} \quad (3.3)$$

Obs.: Em alguns casos, em sistemas radiais, temos  $Z_{aa} = Z_{ba}$ . Num caso como este, deve-se injetar corrente na barra b e não na a.

Considere-se agora, que o conhecimento do sistema que está sendo analisado, indica que na emergência da perda da linha a-b, as linhas r-s e u-v, são passíveis de sobrecarga. Deve-se, então, examinar os incrementos de corrente nas linhas r-s e u-v quando a linha a-b é removida.

Conhecida a corrente injetada na barra a, pela fórmula (3.3), pode-se obter as tensões e conseqüentemente as correntes nas linhas r-s e u-v, antes da remoção, utilizando novamente as definições de impedâncias de transferência. É importante notar, que estas tensões e correntes nada têm a ver com os valores do caso base. A única exigência que está sendo satisfeita, com a injeção de corrente na barra a, é a re

lativa a corrente na linha a-b. Tem-se então:

$$\begin{aligned} E_r &= Z_{ra} I_a & E_u &= Z_{ua} I_a \\ E_s &= Z_{sa} I_a & E_v &= Z_{va} I_a \end{aligned} \quad (3.4)$$

logo:

$$\begin{aligned} E_r - E_s &= (Z_{ra} - Z_{sa}) I_a \\ E_u - E_v &= (Z_{ua} - Z_{va}) I_a \end{aligned} \quad (3.5)$$

Quando a linha a-b é removida, a corrente  $I$  que estava nela fluindo tem que procurar outros caminhos, o que provoca novas diferenças de tensão ao longo das linhas. Pode-se obter estas novas diferenças de tensão usando ainda outra vez as definições de impedâncias de transferência, agora com os valores das impedâncias do sistema modificadas pela remoção da linha a-b. Tomaremos a corrente injetada na barra a como constante, o que nos dá a hipótese fundamental do método, ou seja, correntes injetadas no sistema não se alteram com as contingências. Tem-se, então:

$$\begin{aligned} E'_r &= Z'_{ra} I_a & E'_u &= Z'_{ua} I_a \\ E'_s &= Z'_{sa} I_a & E'_v &= Z'_{va} I_a \end{aligned} \quad (3.6)$$

O que nos dá:

$$E'_r - E'_s = (Z'_{ra} - Z'_{sa}) I_a \quad (3.7)$$

e

$$E'_u - E'_v = (Z'_{ua} - Z'_{va}) I_a$$

Conhecidas as diferenças de tensão nas linhas r-s e u-v antes e depois da remoção, pode-se calcular os

incrementos de corrente nestas linhas devido a remoção, ou seja:

$$\Delta I_{rs} = \frac{(E'_r - E'_s) - (E_r - E_s)}{z_{\text{linha } r-s}} \quad (3.8)$$

$$\Delta I_{uv} = \frac{(E'_u - E'_v) - (E_u - E_v)}{z_{\text{linha } u-v}} \quad (3.9)$$

onde

$z_{\text{linha } r-s}$  e  $z_{\text{linha } u-v}$  são as impedâncias das linhas r-s e u-v.

Para obter-se as correntes finais nas linhas r-s e u-v, basta adicionarmos as correntes do caso base aos incrementos devido à contingência, logo:

$$I_{rs} = \bar{I}_{rs} + \Delta I_{rs} = \frac{\bar{E}_r - \bar{E}_s}{z_{\text{linha } r-s}} + \bar{E}_r \left( \frac{y_{\text{linha } r-s}}{2} \right) + \Delta I_{rs} \quad (3.10)$$

$$I_{uv} = \bar{I}_{uv} + \Delta I_{uv} = \frac{\bar{E}_u - \bar{E}_v}{z_{\text{linha } u-v}} + \bar{E}_u \left( \frac{y_{\text{linha } u-v}}{2} \right) + \Delta I_{uv} \quad (3.11)$$

onde

$\bar{E}_r$ ,  $\bar{E}_s$ ,  $\bar{E}_u$  e  $\bar{E}_v$  são tensões do caso base.

$y_{\text{linha } r-s}$  e  $y_{\text{linha } u-v}$  são as admitâncias "shunt" das linhas r-s e u-v.

### 3.3 - Contingência Múltipla

Imagine agora que as linhas a-b, c-d e e-f devam ser removidas simultaneamente. Agora três condições de-

vem ser satisfeitas, já que deve-se ter correntes nas 3 linhas iguais as de antes do defeito. Para que tais condições sejam atendidas, deve-se determinar três injeções de corrente. Um tratamento matricial é mais adequado neste caso. Seja a matriz abaixo, extraída da matriz Z-Barra do sistema conhecido, e o vetor de tensões obtido a partir das tensões do caso base.

$$\begin{array}{c}
 a \quad b \quad c \quad d \quad e \quad f \\
 \left[ \begin{array}{cccccc}
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & 
 \end{array} \right] \begin{array}{c} I_a \\ 0 \\ I_c \\ 0 \\ I_e \\ 0 \end{array} = \begin{array}{c} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \\ \bar{E}_d \\ \bar{E}_e \\ \bar{E}_f \end{array} \quad (3.12)
 \end{array}$$

Novamente pode-se observar que como foram escolhidas as barras a, c e e para a injeção das correntes, bem poderiam ter sido escolhidas outras três barras quaisquer. Subtraia-se agora, por conveniência, cada segunda linha da linha anterior, tanto da matriz Z quanto do vetor tensão da equação matricial (3.12). Ter-se-á, então:

$$\begin{array}{c}
 a \quad b \quad c \quad d \quad e \quad f \\
 \left[ \begin{array}{cccccc}
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & 
 \end{array} \right] \begin{array}{c} I_a \\ 0 \\ I_c \\ 0 \\ I_e \\ 0 \end{array} = \begin{array}{c} \bar{E}_a - \bar{E}_b \\ \bar{E}_c - \bar{E}_d \\ \bar{E}_e - \bar{E}_f \end{array} \quad (3.13)
 \end{array}$$

Omitindo toda segunda coluna na matriz Z e valores de corrente injetadas nulas tem-se uma maior condensação:

$$\begin{array}{c}
 a \quad c \quad e \\
 \left[ \begin{array}{ccc}
 & & \\
 & & \\
 & & \\
 & & \\
 & & \\
 & & \\
 & & 
 \end{array} \right] \begin{array}{c} I_a \\ I_c \\ I_e \end{array} = \begin{array}{c} \bar{E}_a - \bar{E}_b \\ \bar{E}_c - \bar{E}_d \\ \bar{E}_e - \bar{E}_f \end{array} \quad (3.14)
 \end{array}$$

Como queremos obter as correntes injetadas nas barras a, c e e, é necessário inverter-se a matriz  $Z$ , logo:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_c \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{matrix} a & c & e \\ a-b & & \\ c-d & & \\ e-f & & \end{matrix} \begin{bmatrix} Z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_a - \bar{E}_b \\ \bar{E}_c - \bar{E}_d \\ \bar{E}_e - \bar{E}_f \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Deve ser observado que as barras utilizadas para injeção de corrente, devem ser independentes, isto é, como uma única injeção de corrente pode apenas satisfazer uma restrição, os pontos de injeção devem ser independentes. Consideremos agora que deseje-se novamente examinar o que ocorre nas linhas  $r-s$  e  $u-v$ , quanto a seus carregamentos com a remoção das linhas  $a-b$ ,  $c-d$  e  $e-f$ . Deve-se agora determinar os incrementos de corrente nestas linhas, a partir das definições de impedâncias de transferência. Extraia-se a matriz abaixo da matriz  $Z$ -Barra do sistema.

$$\begin{matrix} & a & b & c & d & e & f & r & s & u & v \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ r \\ s \\ u \\ v \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cccccccccccc} & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \end{array} \right] & \end{matrix} \quad (3.16)$$

Utilizando o algoritmo de construção, removem-se as linhas  $a-b$ ,  $c-d$  e  $e-f$ , adicionando linhas com impedâncias de mesmo valor e sinal contrário as destas mesmas linhas. Ter-se-á, então, obtido  $Z'$  a partir de  $Z$ , onde  $Z'$  representa o sistema após a contingência.

Seguindo o mesmo procedimento adotado no cálculo de contingências simples, deve-se agora obter as diferenças de tensão entre as barras onde está se examinando o carga

mento, a partir das injeções de corrente. Extraíndo da matriz Z os elementos apropriados vem:

$$\begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ r-s & & & & & & \\ & & & & & & \\ u-v & & & & & & \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} I_a \\ 0 \\ I_c \\ 0 \\ I_e \\ 0 \\ 0 \end{matrix} = \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} E_r - E_s \\ \\ \\ \\ E_u - E_v \\ \\ \end{matrix} \quad (3.17)$$

que pode ser reduzida para:

$$\begin{matrix} & a & & c & & e \\ r-s & & & & & \\ & & & & & \\ u-v & & & & & \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} I_a \\ I_c \\ I_e \end{matrix} = \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} E_r - E_s \\ \\ \\ \\ E_u - E_v \\ \\ \end{matrix} \quad (3.18)$$

Como os elementos da matriz Z e as correntes injetadas são conhecidas, teremos determinado as diferenças de tensão antes da contingência.

A partir da matriz Z', extraíndo elementos convenientes ter-se-ão novas diferenças de tensão, ou ainda as diferenças de tensão após a contingência, conforme mostra a equação matricial abaixo:

$$\begin{matrix} & a & & c & & e \\ r-s & & & & & \\ & & & & & \\ u-v & & & & & \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} I_a \\ I_c \\ I_e \end{matrix} = \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} E'_r - E'_s \\ \\ \\ \\ E'_u - E'_v \\ \\ \end{matrix} \quad (3.19)$$

As variações nas diferenças de tensão refletem a modificação da distribuição de corrente, ocorrida quando as correntes que fluíam nas linhas a-b, c-d e e-f são forçadas a procurar outros caminhos.

O cálculo dos incrementos de corrente e correntes finais nas linhas, seguem a mesma sequência mostrada na contingência simples, ou seja:

$$\Delta E_{rs} = (E'_r - E'_s) - (E_r - E_s) \quad (3.20)$$

$$\Delta E_{uv} = (E'_u - E'_v) - (E_u - E_v)$$

$$\Delta I_{rs} = \frac{\Delta E_{rs}}{z_{\text{linha } r-s}} = \frac{(E'_r - E'_s) - (E_r - E_s)}{z_{\text{linha } r-s}} \quad (3.21)$$

$$\Delta I_{uv} = \frac{\Delta E_{uv}}{z_{\text{linha } u-v}} = \frac{(E'_u - E'_v) - (E_u - E_v)}{z_{\text{linha } u-v}}$$

logo:

$$I'_{rs} = \bar{I}_{rs} + \Delta I_{rs} = \frac{\bar{E}_r - \bar{E}_s}{z_{\text{linha } r-s}} + \bar{E}_r \frac{y_{\text{linha } r-s}}{2} + \Delta I_{rs} \quad (3.22)$$

$$I'_{uv} = \bar{I}_{uv} + \Delta I_{uv} = \frac{\bar{E}_u - \bar{E}_v}{z_{\text{linha } u-v}} + \bar{E}_u \frac{y_{\text{linha } u-v}}{2} + \Delta I_{uv} \quad (3.23)$$

### 3.4 - Contingência Causada por Adição de Linha

Uma contingência não precisa necessariamente ocorrer devido a perda de uma linha de transmissão. O fechamento de uma linha que estava fora de serviço por algum motivo ou a construção de uma nova linha, pode causar uma redistribuição dos fluxos no sistema tal que ocorram sobrecargas em algumas linhas. O método aqui apresentado não se restringe, como os demais, à investigação de contingências causadas por remoção de linhas. Considere o sistema apresentado na figura 3.3.

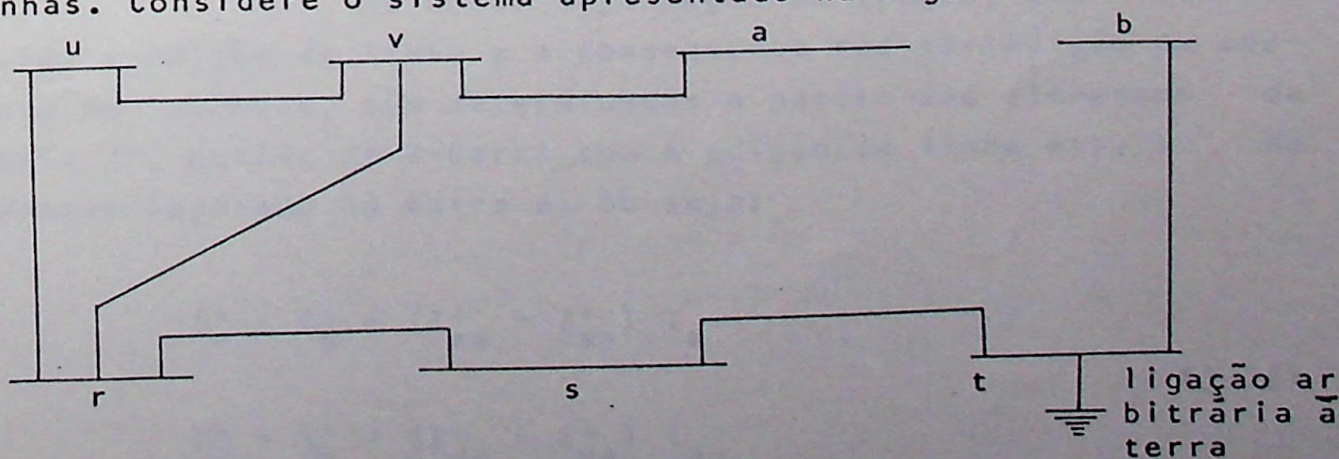


Fig. 3.3 - Sistema de transmissão antes da adição da linha a-b

Deve-se determinar se a adição de uma linha entre as barras a e b irá produzir sobrecarga em linhas sensíveis a esta modificação. A matriz Z-Barra, para o sistema normal (linha fora de serviço), deve ser conhecida. O caso base, também com a linha fora de serviço, deve estar disponível. É preciso, então, determinar uma corrente a ser injetada na barra a, tal que a diferença de tensão obtida entre as barras a e b, seja igual a diferença de tensão obtida do caso base. Logo, a corrente requerida é:

$$I_a = \frac{\bar{E}_a - \bar{E}_b}{Z_{aa} - Z_{ba}} \quad (3.24)$$

onde  $\bar{E}_a$  e  $\bar{E}_b$  são tensões do caso base

Observa-se, assim, a total semelhança com a equação (3.3) obtida no cálculo de contingências simples. A única diferença é que a corrente que flui entre as barras a e b é nula, já que em regime normal não temos linha entre estas barras.

Conhecida a corrente injetada na barra a, pode-se determinar as diferenças de tensão ao longo da linha r-s e u-v que são as linhas onde há interesse de verificação dos carregamentos. Teremos, então:

$$E_r - E_s = (Z_{ra} - Z_{sa}) I_a \quad (3.25)$$

$$E_u - E_v = (Z_{ua} - Z_{va}) I_a$$

As novas diferenças de tensão, que ocorrem devido a adição da linha e a consequente redistribuição de corrente no *network*, são determinadas a partir dos elementos da matriz  $Z'$ , obtida de Z-Barra com a adição da linha a-b, e da corrente injetada na barra a, ou seja:

$$E'_r - E'_s = (Z'_{ra} - Z'_{sa}) I_a \quad (3.26)$$

$$E'_u - E'_v = (Z'_{ua} - Z'_{va}) I_a$$

Logo, os incrementos de corrente nas linhas r-s e u-v serão:

$$\Delta I_{rs} = \frac{(E'_r - E'_s) - (E_r - E_s)}{Z_{\text{linha } r-s}} \quad (3.27)$$

$$\Delta I_{uv} = \frac{(E'_u - E'_v) - (E_u - E_v)}{Z_{\text{linha } u-v}}$$

Portanto, nota-se que contingências causadas por adições de linhas, podem ser tratadas neste método com bastante simplicidade.

### 3.5 - Cálculo das Tensões

Sejam as barras A e K representadas na figura 3.4 respectivamente: barra onde se deseja obter a tensão após a contingência (simples ou múltipla) e barra com tensão constante antes e depois da contingência.

Imagine-se também, que a barra A esteja conectada à referência através da ligação arbitrária de impedância  $Z_T$ .

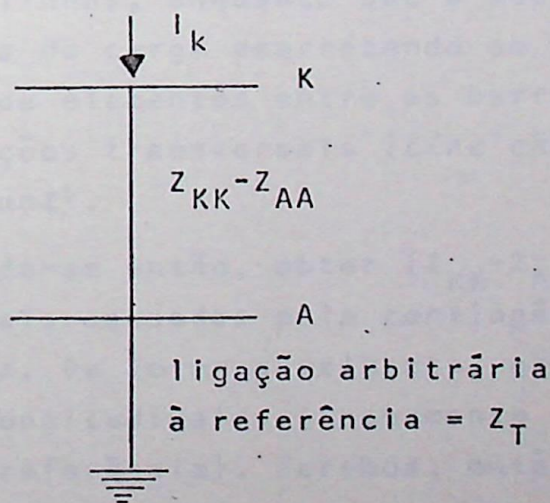


Figura 3.4

Da definição das impedâncias de *driving-point* pode-se observar que a impedância entre K e A na figura 3.4 nada mais é do que uma impedância equivalente igual a  $Z_{KK} - Z_{AA}$ , elementos estes conhecidos da matriz Z-Barra do sistema antes da contingência, com a ligação arbitrária à referência,  $Z_T$ , na barra A.

Imagine-se, agora, uma corrente injetada na barra K tal que a diferença de tensão entre as barras K e A seja

igual à do caso base. Teremos, então:

$$I_K = \frac{\bar{E}_K - \bar{E}_A}{Z_{KK} - Z_{AA}} \quad (3.28)$$

$\bar{E}_K$  e  $\bar{E}_A$  são valores de tensão do caso base.

Com a corrente  $I_K$  conhecida e com a tensão da barra A do caso base, pode-se determinar o valor real da impedância  $Z_L$  que liga a barra A à referência, ou seja, a impedância que representa a carga. Teremos, então:

$$Z_L = \frac{\bar{E}_A}{I_K} \quad (3.29)$$

Após a contingência ocorrerá variação da impedância equivalente entre as barras K e A, bem como da impedância  $Z_L$  que representa a carga. A modificação da impedância equivalente ( $Z_{KK} - Z_{AA}$ ) acarretando em  $(Z_{KK} - Z_{AA})'$  é função basicamente das modificações longitudinais do *network* causadas pelas adições e/ou remoções de linhas, enquanto que a modificação da impedância representativa da carga acarretando em  $Z_L'$  é função das remoções e/ou adições de elementos entre as barras e a referência, ou ainda modificações transversais (*line chargings* e capacitores ou reatores *shunt*).

Pode-se então, obter  $(Z_{KK} - Z_{AA})'$  a partir das modificações transversais causadas pela contingência sobre a matriz Z-Barra do sistema. De forma semelhante, obtemos  $Z_L'$  a partir das modificações longitudinais. (Fechamento de *loops* entre barras do sistema e a referência). Teremos, então, o sistema nas condições da figura 3.5.

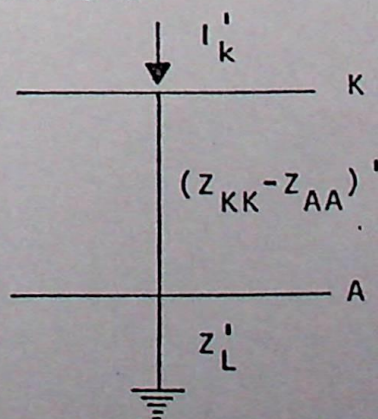


Figura 3.5

Pode-se, então, determinar a corrente  $I'_K$ , que acarreta na tensão da barra K conhecida do caso base, já que esta barra é de tensão constante. Teremos, então:

$$I'_K = \frac{\bar{E}_K}{(Z_{KK} - Z_{AA})' + Z'_L} \quad (3.30)$$

Conhecido  $I'_K$  pode-se obter  $E'_A$  diretamente pela expressão:

$$E'_A = I'_K Z'_L \quad (3.31)$$

Para o cálculo da tensão em uma outra barra B, por exemplo, basta trabalharmos convenientemente a matriz Z-Barra, de forma a termos a barra B conectada à referência, e repetimos todo o processo.

### 3.6 - Programa Utilizado

Foi elaborado um programa em linguagem FORTRAN para o cálculo de contingências. Tal programa utiliza dados de linhas, barras e matriz Z-Barra, previamente gravados em fita magnética. São permitidas contingências devido a adição ou remoção de linhas até um máximo de 10 modificações no sistema e pode-se solicitar o cálculo de até 100 contingências dependentes ou não. O fluxograma apresentado a seguir esquematiza a sequência do programa. (As listagens do programa elaborado são encontradas no anexo III).

INÍCIO

LÊ DA FITA MAGNÉTICA :

- DADOS DAS BARRAS
- DADOS DAS LINHAS
- MATRIZ Z-BARRA
- BARRA CONEC. À REF.

1

QUER IMPRESSÃO DOS DADOS DA FITA MAGNÉTICA ?

SIM

IMPRIME :  
DADOS DAS BARRAS  
DADOS DAS LINHAS  
MATRIZ Z-BARRA

NÃO

CASO TEM TÍTULO ?

SIM

LÊ TÍTULO DO CASO

IMPRIME TÍTULO DO CASO

NÃO

QUER ADICIONAR E/OU REMOVER LINHAS ?

SIM

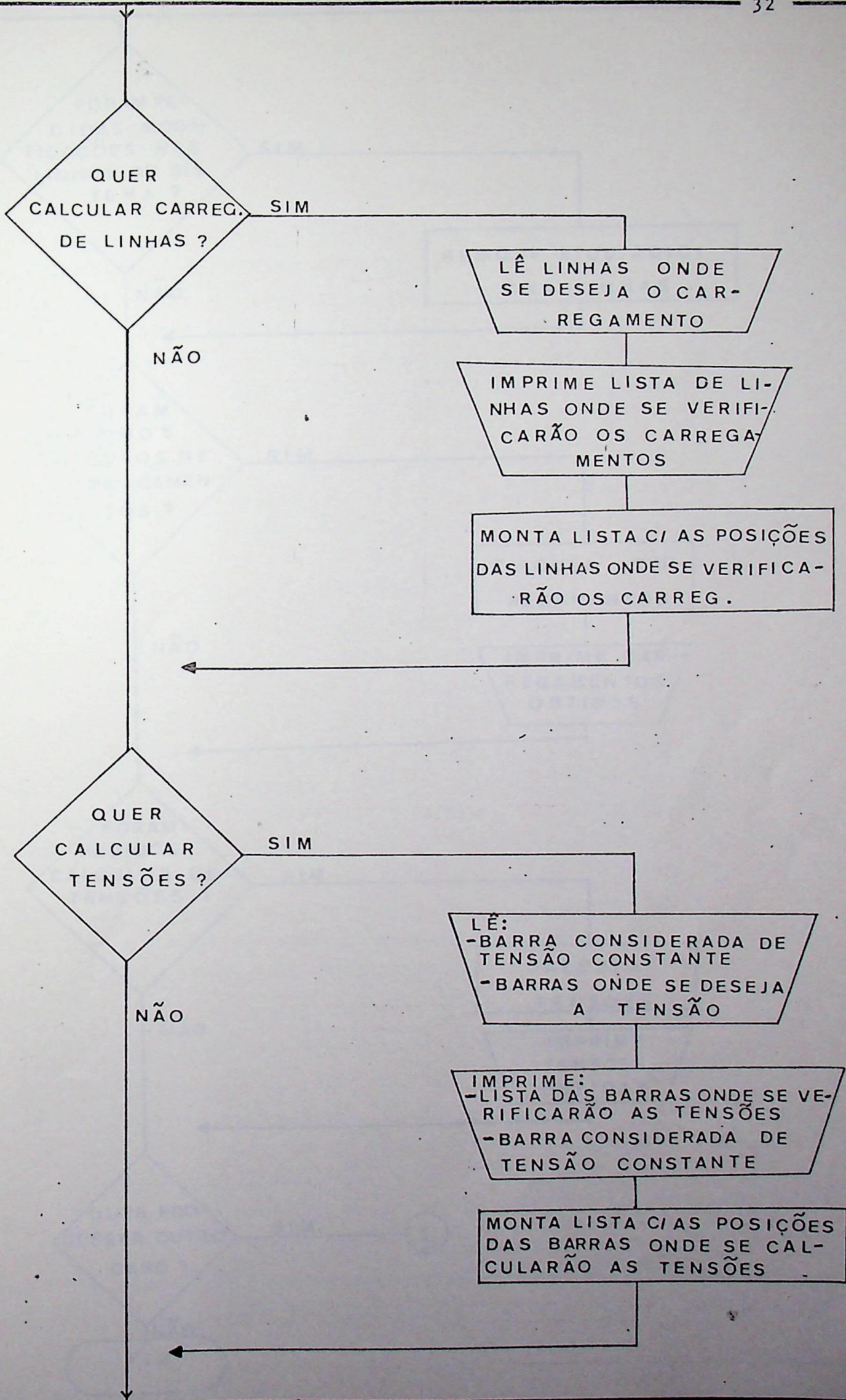
LÊ LINHAS A SEREM REMOVIDAS E/OU ADICIONADAS

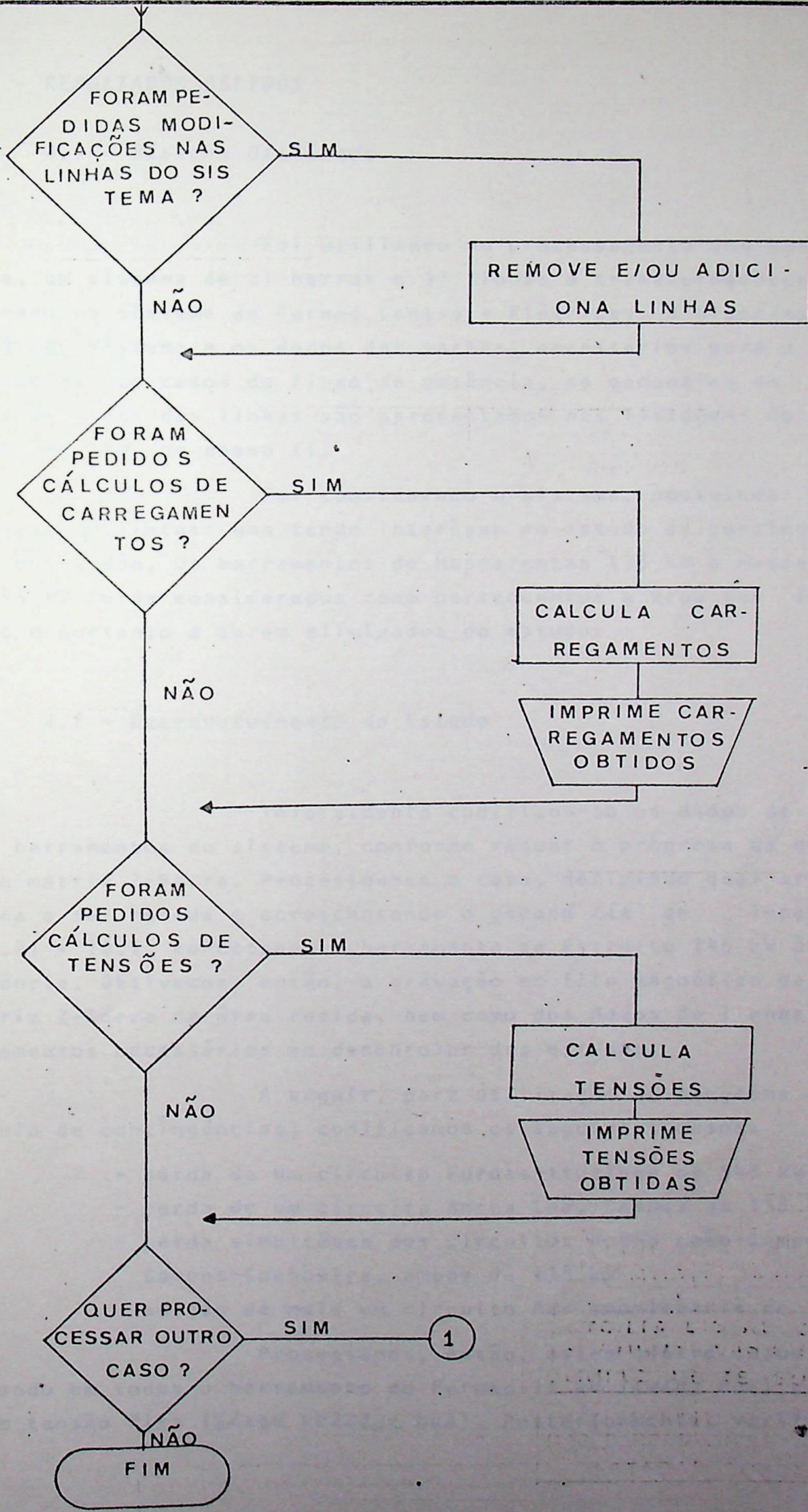
IMPRIME LISTA DAS LINHAS A SEREM MODIFICADAS

MONTA LISTAS COM :  
- POSIÇÕES DAS LINHAS  
- IMPEDÂNCIAS DAS LINHAS

MONTA LISTA COM POSIÇÕES DAS BARRAS ONDE SERÃO INJETADAS CORRENTES

NÃO





## 4 - RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 - Sistema Utilizado

Foi utilizado no processamento dos casos teste, um sistema de 21 barras e 37 linhas e transformadores, baseado no sistema de Furnas Centrais Elétricas. O diagrama unifilar do sistema e os dados das barras, necessários para o processamento dos casos de fluxo de potência, se encontram no anexo I. Os dados das linhas são apresentados nas listagens do programa Z-Barra, no anexo II.

Foi considerado o sistema, possuindo duas áreas distintas: uma tendo interesse no estudo de contingências e outra não. Os barramentos de Mascarenhas 138 kV e Mascarenhas 345 kV foram considerados como pertencentes a área sem interesse e portanto a serem eliminados do estudo.

### 4.2 - Desenvolvimento do Estudo

Inicialmente codificou-se os dados de linhas e barramentos do sistema, conforme requer o programa de cálculo da matriz Z-Barra. Processou-se o caso, definindo qual era a área a ser retida e acrescentando o *ground tie* de impedância  $0.01 + j0.1$ , conectando o barramento de Estreito 345 kV à referência. Obtivemos, então, a gravação em fita magnética da matriz Z-Barra da área retida, bem como dos dados de linhas e barramentos necessários ao desenrolar dos estudos.

A seguir, para utilização do programa de cálculo de contingências, codificamos os seguintes casos:

- perda de um circuito Furnas-Itutinga de 345 kV
- perda de um circuito Rocha Leão-Campos de 138 kV
- perda simultânea dos circuitos Rocha Leão-Campos e Campos-Cachoeira, ambos de 138 kV
- adição de mais um circuito Adriano-Imbariê de 138 kV

Processamos, então, estes quatro casos, tomando em todos o barramento de Furnas 15 kV (*swing bus*) como o de tensão fixa (*fixed voltage bus*). Posteriormente, verificou-se

necessário o processamento das três últimas contingências, tomando-se o barramento de Adriano 345 kV como o de tensão fixa.

Finalizando, foram calculadas as quatro contingências, através de casos de fluxo de potência e comparados estes resultados com os do método apresentado neste trabalho.

#### 4.3 - Apresentação dos Resultados

As tabelas a seguir, sumarizam as comparações entre os resultados obtidos por fluxos de potência e os obtidos com o método de cálculo de contingências para as quatro condições estudadas.

#### 4.3.1 - Emergência Perda de um Circuito Furnas-Itutinga de 345 kV

##### a. Carregamento das Linhas

LINHA	ANTES DA CONTINGÊNCIA		APÓS A CONTINGÊNCIA			
	CORRENTE (pu)		CORRENTE (pu)		CORRENTE/CAPACIDADE NOMINAL	
	LOAD FLOW		LOAD FLOW	CONTINGÊNCIA	LOAD FLOW	CONTINGÊNCIA
Furnas-Itutinga 345 kV	6.553	3.505	5.967		108%	99%
Adriano-Poços 345 kV	3.760	2.370	3.292		42%	36%

b. Tensões nos barramentos

- Furnas 15 kV como *fixed voltage bus*

BARRAMENTO	APÓS A CONTINGÊNCIA										
	ANTES DA CONTINGÊNCIA					TENSÕES					RAZÃO
	TENSÃO		LOAD FLOW			CONTINGÊNCIA			E Cont./  E Load Flow		
	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)			
Furnas 345 kV	0.999	- 5.89	0.973	- 6.22	0.989	- 5.83				1.016	
Itutinga 345 kV	0.976	-18.63	0.858	-31.81	0.888	-25.83				1.035	
Adriano 345 kV	0.958	-31.63	0.848	-46.33	0.876	-35.82				1.033	
Jacaré 345 kV	0.957	-34.00	0.854	-49.40	0.874	-37.61				1.023	
Jacaré 138 kV	0.964	-39.24	0.880	-55.87	0.875	-41.68				0.994	
Adriano 138 kV	1.008	-34.88	0.885	-50.55	0.920	-37.24				1.040	
Imbariê 138 kV	0.996	-36.46	0.871	-52.61	0.908	-37.46				1.042	

4.3.2 - Emergência Perda de um Circuito Rocha Leão-Campos de 138 kV

a. Carregamento das Linhas

LINHA	ANTES DA CONTINGÊNCIA		APÓS A CONTINGÊNCIA			
	CORRENTE (pu)		CORRENTE (pu)		CORRENTE/CAPACIDADE NOMINAL	
	LOAD FLOW	CONTINGÊNCIA	LOAD FLOW	CONTINGÊNCIA	LOAD FLOW	CONTINGÊNCIA
Rocha Leão-Campos 138 kV	0.195		0.383	0.379	45%	44%
Adriano-Rocha Leão 138 kV	0.522		0.519	0.522	60%	61%
Campos-Cachoeira 138 kV	0.060		0.064	0.070	7%	8%

## b. Tensões nos Barramentos

- Furnas 15 kV como fixed voltage bus

BARRAMENTO	ANTES DA CONTINGÊNCIA		APÓS A CONTINGÊNCIA						RAZÃO  E Cont./  E Load Flow
	T E N S Ã O		T E N S Õ E S		L O A D F L O W		C O N T I N G Ê N C I A		
	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	
Adriano 138 kV	1.008	-34.88	0.999	-35.15	1.004	-34.70			0.991
Imbariê 138 kV	0.996	-36.46	0.987	-36.76	0.992	-36.23			1.005
Rocha Leão 138kV	1.004	-46.28	0.971	-46.77	0.994	-45.37			1.024
Campos 138 kV	1.002	-49.07	0.948	-52.64	0.862	-59.53			0.909
Cachoeira 138 kV	0.988	-49.85	0.933	-53.50	0.878	-57.06			0.941

- Adriano 345 kV como fixed voltage bus

BARRAMENTO	ANTES DA CONTINGÊNCIA				APÓS A CONTINGÊNCIA				RAZÃO  E Cont./  E Load Flow
	T E N S ã O		L O A D F L O W		T E N S ã O S		C O N T I N G Ê N C I A		
	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	
Adriano 138 kV	1.008	-34.88	0.999	-35.15	1.007	-34.88	1.008		
Imbariê 138 kV	0.996	-36.46	0.987	-36.76	0.994	-36.43	1.007		
Rocha Leão 138 kV	1.004	-46.28	0.971	-46.77	0.990	-45.86	1.020		
Campos 138 kV	1.002	-49.07	0.948	-52.64	0.964	-54.64	1.017		
Cachoeira 138 kV	0.988	-49.85	0.933	-53.50	0.944	-53.37	1.012		

4.3.3 - Emergência Perda Simultânea dos Circuitos Rocha Leão-Campos de 138 kV e Campos-Cachoeira de 138 kV

a. Carregamento das Linhas

LINHA	ANTES DA CONTINGÊNCIA		APÓS A CONTINGÊNCIA			
	CORRENTE (pu)	CORRENTE (pu)	CORRENTE/CAPACIDADE NOMINAL		CORRENTE/CAPACIDADE NOMINAL	CONTINGÊNCIA
			LOAD FLOW	CONTINGÊNCIA		
Adriano-R.Leão 138 kV - I	0.522	0.523	0.522	61%	61%	61%
Adriano-R.Leão 138 kV - II	0.522	0.523	0.522	61%	61%	61%
R.Leão-Campos 138 kV	0.195	0.403	0.379	47%	44%	44%
Campos-Cachoeira 138 kV	0.060	0.173	0.140	20%	16%	16%

## b. Tensões nos Barramentos

- Furnas 15 kV como fixed voltage bus

BARRAMENTO	ANTES DA CONTINGÊNCIA				APÓS A CONTINGÊNCIA				RAZÃO $\frac{ E _{Cont.}}{ E _{Load Flow}}$
	T E N S ã O		L O A D F L O W		T E N S ã O S		C O N T I N G Ê N C I A		
	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	
Adriano 138 kV	1.008	-34.88	0.991	-35.39	1.000	-34.53	1.000	-34.53	1.009
Imbariê 138 kV	0.996	-36.46	0.979	-37.02	0.987	-36.01	0.987	-36.01	1.008
Rocha Leão 138 kV	1.004	-46.28	0.942	-47.21	0.983	-44.49	0.983	-44.49	1.044
Campos 138 kV	1.002	-49.07	0.893	-53.29	0.853	-57.72	0.853	-57.72	0.955
Cachoeira 138 kV	0.988	-49.85	0.848	-55.08	0.775	-62.10	0.775	-62.10	0.914

- Adriano 345 kV como fixed voltage bus

BARRAMENTO	ANTES DA CONTINGÊNCIA		APÓS A CONTINGÊNCIA						RAZÃO  E Cont./  E Load Flow
	T E N S ã O		L O A D F L O W		T E N S ã O S		CONTINGÊNCIA Fase(graus)		
	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)			
Adriano 138 kV	1.008	-34.88	0.991	-35.39	1.005	-34.88	1.014		
Imbariê 138 kV	0.996	-36.46	0.979	-37.02	0.991	-36.41	1.012		
R. Leão 138 kV	1.004	-46.28	0.942	-47.21	0.976	-45.47	1.036		
Campos 138 kV	1.002	-49.07	0.893	-53.29	0.937	-53.45	1.049		
Cachoeira 138 kV	0.988	-49.85	0.848	-55.08	0.887	-56.05	1.046		

4.3.4 - Adição de um Circuito Adriano-Imbariê de 138 kV

a. Carregamento das Linhas

LINHA	ANTES DA CONTINGENCIA		APÓS A CONTINGENCIA			
	CORRENTE (pu)		CORRENTE (pu)		CORRENTE/CAPACIDADE NOMINAL	
			LOAD FLOW	CONTINGENCIA	LOAD FLOW	CONTINGENCIA
Adriano-Imbariê 138 kV I	0.624		0.463	0.467	43%	43%
Adriano-Imbariê 138 kV II	0.624		0.463	0.467	43%	43%
Adriano-Imbariê 138 kV III	0.594		0.441	0.445	51%	52%
Adriano-Imbariê 138 kV IV	0		0.463	0.467	43%	43%

b. Tensões nos Barramentos

- Furnas 15 kV como fixed voltage bus

BARRAMENTO	ANTES DA CONTINGÊNCIA		APÓS A CONTINGÊNCIA					
	T E N S ã O		LOAD FLOW		CONTINGÊNCIA		R A Z ã O	
	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	E Cont./	E Load Flow
Adriano 138 kV	1.008	-34.88	1.011	-34.81	1.009	-34.92	0.998	
Imbariê 138 kV	0.996	-36.46	1.002	-35.98	1.010	-35.02	1.008	
R. Leão 138 kV	1.004	-46.28	1.007	-46.15	1.006	-46.46	0.999	
Campos 138 kV	1.002	-49.07	1.005	-48.93	1.004	-49.36	0.999	

- Adriano 345 kV como fixed voltage bus

BARRAMENTO	ANTES DA CONTINGÊNCIA		APÓS A CONTINGÊNCIA						
	T E N S Ã O		LOAD FLOW		T E N S Õ E S		CONTINGÊNCIA		RAZÃO  E Cont./  E Load Flow
	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	Módulo(pu)	Fase(graus)	
Adriano 138 kV	1.008	-34.88	1.011	-34.81	1.009	-34.89			0.998
Imbariê 138 kV	0.996	-36.46	1.002	-35.98	0.994	-35.87			0.992
R. Leão 138 kV	1.004	-46.28	1.007	-46.15	1.007	-46.37			1.000
Campos 138 kV	1.002	-49.07	1.005	-48.93	1.006	-49.23			1.001

## 4.4 - Análise dos Resultados

### 4.4.1 - Carregamento das Linhas

Das tabelas apresentadas no item anterior, pode-se verificar que enquanto as contingências simples no 138 kV apresentam ótima precisão (1 a 2%), as contingências simples no 345 kV e as múltiplas no 138 kV apresentam maiores discrepâncias (3 a 9%) em relação aos resultados dos fluxos de potência. A este respeito, merecem ser feitos alguns comentários.

O método de cálculo de contingências tem por hipótese fundamental a constância das correntes dos geradores e cargas (correntes injetadas nas barras constantes). As contingências simples no 138 kV são bastante leves para o sistema, o que torna esta hipótese bem verdadeira. As faltas no 345 kV e as contingências múltiplas no 138 kV se revelaram bastante severas chegando mesmo alguns casos de emergências no 345 kV, a não apresentarem convergência, o que fez com que as correntes de geradores apresentassem variações bastante grandes ( $\approx 10\%$  na *swing bus*). Como foi citado em 4.1, o sistema utilizado no estudo foi extraído de um sistema real; porém, devido as simplificações feitas para redução do número de barras (limitação do programa de fluxo de potência usado), tornamos as emergências bem mais severas do que as reais. Devido ao grau de severidade, então assumido pelas emergências, deve-se comparar com cuidado os resultados. A hipótese assumida pelo *load flow*, potências nas cargas constantes independentemente das tensões, pode se revelar excessivamente pessimista. Espera-se, então, que um sistema real, bem representado, apresente discrepâncias bem menores entre os resultados obtidos com um e outro método.

### 4.4.2 - Tensões nos Barramentos

Na emergência no 345 kV, os resultados revelam-se excelentes principalmente levando-se em conta a variação das correntes injetadas nas barras e a hipótese pessimista do fluxo de potência. Nas contingências no 138 kV tivemos alguns problemas quando tomamos o barramento de Furnas 15 kV como a barra de tensão constante. Entretanto, ao tomarmos o barramento

de Adriano 345 kV como a barra de tensão constante, o que é perfeitamente viável, obtivemos excelentes resultados.

Os resultados obtidos para as fases das tensões são bastante bons nas emergências no 138 kV, enquanto no 345 kV ocorrem discrepâncias excessivas. Parece-nos que tais erros devem-se a hipótese de corrente constante assumida no método o que suaviza os valores dos carregamentos em relação aos obtidos por fluxos de potência, implicando em menores defasagens.

Como observação final é necessário que se note, que o método utilizado no cálculo de tensões é inteiramente novo, podendo ser considerado em fase de testes. Ainda não temos meios de justificar teoricamente a razão de algumas discrepâncias apresentadas, como quando consideramos o barramento de Furnas 15 kV como de tensão constante (por enquanto, acreditamos que o problema seja numérico), de forma que é necessário processamento e análise de um maior número de casos.

## 5 - APLICAÇÕES DO MÉTODO

### 5.1 - "Off-Line"

Uma primeira utilização *off-line* do método poderia ser na relação de quais emergências, dentre uma lista, mereceriam ser analisadas detalhadamente por estudos de fluxo de potência. Dispondo de um grande sistema a ser estudado, levantaríamos inicialmente, todas as emergências que merecessem análise. Processaríamos, então, tais emergências com o uso do método de cálculo de contingências. A partir dos resultados obtidos, selecionaríamos, então, quais as emergências que mereceriam análise detalhada (*load flow*).

Outra aplicação poderia ser feita conforme o fluxograma apresentado em [12] e reproduzido no item 1. A finalidade seria, então, a pesquisa dos pontos fracos de um sistema do qual temos pouca experiência, ou para darmos maior confiabilidade a estudos realizados, evitando o risco de termos deixado de analisar uma contingência importante.

A grande vantagem da aplicação do método de cálculo de contingências em estudos *off-line* seria a minimização de tempo computacional causado pela diminuição do número de casos de fluxo de potência necessários. Deve-se notar que a aplicação do método não tem por objetivo a substituição de estudos de fluxo de potência e sim a diminuição do número de estudos necessários.

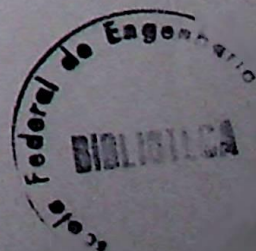
### 5.2 - "On-Line"

Uma primeira aplicação *on-line* do método, poderia ser feita de maneira semelhante a utilizada no computador do centro de despacho de carga da Interconexão Pennsylvania-New Jersey-Maryland (PJM) [11].

Periodicamente, (10 em 10' no PJM), o computador calcularia o efeito de cada contingência de uma grande lista. Esta poderia conter saídas ou adições simples de linhas, saídas ou adições de diversas linhas, perdas de unidades geradoras ou modificações de despachos de geração. (As referências [1-2, 13-14] indicam a maneira de se incorporar estas duas últimas

contingências ao estudo). Se determina-se que a ocorrência de uma ou mais contingências da lista implica em quebra de limites (sobrecargas ou tensões inadmissíveis), uma recomendação para alívio do sistema é "printada". A recomendação seria tal que tirasse o sistema da condição de possível quebra de limites. Em tal aplicação, precisamos dispor da matriz Z-Barra do sistema para a situação operativa real e dos valores telemedidos de fluxos e tensões necessários aos cálculos das contingências programadas. Utilizando-se fatores de distribuição [10-11], é possível não só imprimir um sinal de alerta ao operador, como também propor um método de alívio para o sistema.

Outra aplicação do método seria na programação de desligamentos ou entradas em serviço de linhas do sistema. Antes de ser efetuada uma manobra, processar-se-ia o caso para verificação do efeito da modificação de configuração do sistema. Caso fossem previstas quebras de limites, seriam "printados" os limites quebrados de forma a alertar o operador para possíveis alterações na programação.



## 6 - CONCLUSÕES

Dispomos de um método extremamente rápido e com pequena ocupação de memória computacional, para o cálculo de contingências. Os resultados obtidos com o sistema utilizado no estudo, revelaram boa precisão quanto aos carregamentos das linhas. Apesar da parte do método relacionada ao cálculo das tensões ainda se encontrar em fase de testes, parece-nos que podemos calcular as magnitudes das tensões nas barras de interesse, desde que se escolha convenientemente o barramento a ser considerado como de tensão constante. Quanto as fases, os resultados obtidos podem ser usados, porém, com maiores reservas.

O método aqui apresentado tem aplicações tanto na programação *Off-Line* como na *On-Line*. Na aplicação *Off-Line* sua finalidade seria a otimização da utilização de programas de fluxo de potência (bem mais demorados e ocupando memória computacional muito maior). Na aplicação *On-Line* o objetivo seria aumentar o grau de confiabilidade de operação, com a supervisão do estado do sistema e com o fornecimento de proposições para se sair de um estudo operativo onde houvessem riscos.

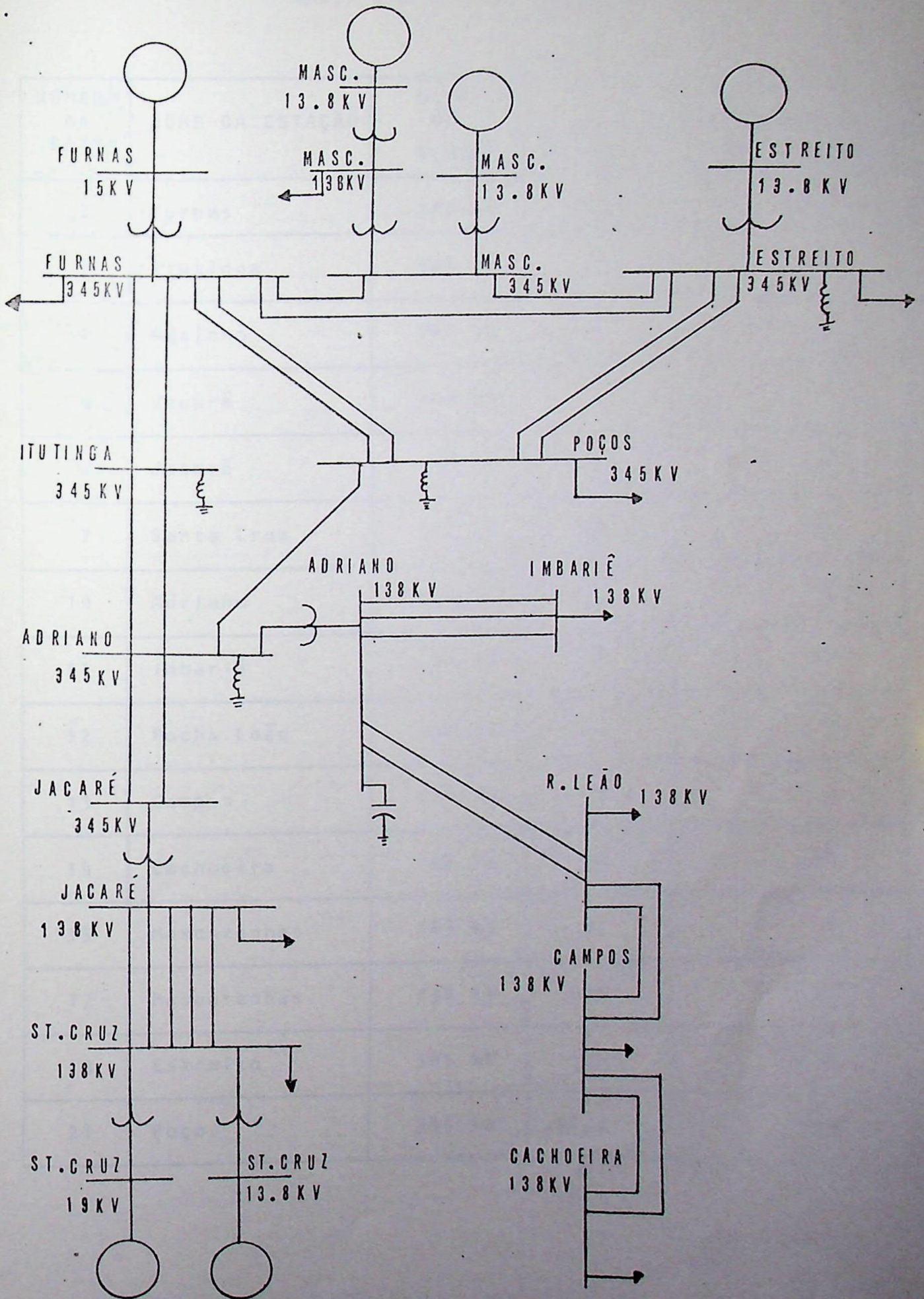
## BIBLIOGRAFIA

1. Solution of Large Networks by Matrix Methods  
Autor: Homer E. Brown  
Editôra: John Wiley & Sons, Inc.
2. Notas de aula do Curso Análise de Sistemas Elétricos (DEL 880), EFEI, 1975, ministrado por Homer E. Brown
3. Digital Solution of Power Flow Problems  
Autores: J.B.Ward e H.W.Hale  
Publicado em: AIEE Transactions, Vol. 75, 1956, págs.398-404
4. Numerical Methods in Engineering  
Autores: Savadore e Baron  
Editôra: Prentice Hall
5. Elimination Methods for Load Flow Studies  
Autores: J.E.Van Ness e J.H. Griffin  
Publicado em: AIEE Transactions, Vol. 80, 1961, Pág. 299
6. Technique for Exploiting the Sparsivity of the Network Admittance Matrix  
Autores: N.Sato e W.F.Tinney  
Publicado em: IEEE Transactions, Vol. 82, 1963, Pág. 944
7. Power Flow Solutions by Newton's Method  
Autores: W.F.Tinney e C.E.Hart  
Publicado em: IEEE Transactions, Vol. 86, 1967, Pág. 1449
8. Direct Solution of Sparse Network Equation by Optimally Ordered Triangular Factorization  
Autores: W.F.Tinney e J.W.Walker  
Publicado em: IEEE Proceedings, Vol. 55, 1967, Págs.1801-1809
9. Power Flow Solution by Impedance Matrix Method  
Autores: H.E.Brown, G.K.Carter, H.H.Happ e C.E.Person  
Publicado em: AIEE Transactions, Vol. 82, 1963, pág. 1
10. Transmission Limitations Computed by Superposition  
Autor: C.A.MacArthur  
Publicado em: AIEE Transactions, Vol. 57, 1961, Pág. 827

- X11. Techniques and Applications of Security Calculations Applied to Dispatching Computers  
Autor: H.D. Limmer  
Publicado em: PSSC Proceedings, Vol. 2, 1969, Paper STY4
12. Automatic Evaluation of Power System Performance - Effects on Line and Transformer Outage  
Autores: A.H. El-Abiad e G.W. Stagg  
Publicado em: AIEE Transactions, Vol. 64, 1963, Págs. 712
13. Contingencies Evaluated by a Z-Matrix Method  
Autor: H.E. Brown  
Publicado em: IEEE Transactions, Vol. 88, 1969, Págs. 409
14. Interchange Capability and Contingency Evaluation by a Z-Matrix Method  
Autor: H.E. Brown  
Publicado em: IEEE Transactions, Vol. 91, 1972, Págs. 1827
15. Digital Calculation of Three-Phase Short Circuits by Matrix Method  
Autores: H.E. Brown, C.E. Person, L.K. Kirchmayer e G.W. Stagg  
Publicado em: AIEE Transactions, Vol. 79, 1960, Págs. 1277-1281
16. Short Circuit Studies of Large Systems by the Impedance Matrix Method  
Autores: H.E. Brown e C.E. Person  
Publicado em: PICA Conference Proceedings, 1967, Págs. 335-342.

A N E X O I

- DIAGRAMA UNIFILAR
- DADOS DO SISTEMA



- DADOS DAS BARRAS DE CARGA -

NÚMERO DA BARRA	NOME DA ESTAÇÃO	NÍVEL DE TENSÃO	C A R G A	
			ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
2	Furnas	345 kV	227	- 44
3	Itutinga	345 kV	0	0
4	Adriano	345 kV	0	0
5	Jacarê	345 kV	0	0
6	Jacarê	138 kV	716	36
7	Santa Cruz	138 kV	69.7	22
10	Adriano	138 kV	0	0
11	Imbariê	138 kV	181	36
12	Rocha Leão	138 kV	61	- 8
13	Campos	138 kV	24	- 1
14	Cachoeira	138 kV	12	14
15	Mascarenhas	345 kV	0	0
17	Mascarenhas	138 kV	216	15
19	Estreito	345 kV	-23	- 66
21	Poços	345 kV	1232	188

- DADOS DE COMPENSAÇÃO REATIVA -

NÚMERO DA BARRA	NOME DA ESTAÇÃO	NÍVEL DE TENSÃO	COMPENSAÇÃO (MVAR)	
			CAPACITOR	REATOR
3	Itutinga	345 kV		1 x 60
4	Adriano	345 kV		1 x 60 1 x 65
10	Adriano	138 kV	1 x 40	
19	Estreito	345 kV		1 x 60
21	Poços	345 kV		1 x 65

- DADOS DAS BARRAS DE GERAÇÃO -

NÚMERO DA BARRA	NOME	TENSÃO NOMINAL	TENSÃO DESEJADA (PU)	DESPACHO DE GERAÇÃO (MW)	LIMITES DE POTÊNCIA REATIVA (MVAR)	
					MÁXIMO	MÍNIMO
1	Furnas	15 kV	1.005	*1	*1	*1
8	Santa Cruz	19 kV	1.05	110	220	-170
9	Santa Cruz	13.8kV	1.02	90	130	-130
16	Mascarenhas	13.8kV	1.03	300	200	-200
18	Mascarenhas	13.8kV	1.01	176	62	0
20	Estreito	13.8kV	1.003	1050	420	-540

\* 1 Furnas 15 kV é a barra *swing*

A N E X O II

- Listagem do Programa Z-Barra

AREA A SER RETIDA

BARRA	NOME	MOD.TENSAD(PU)	FASE(GRAUS)
1	FUR---15	1.005	0.01
2	FUR---345	0.999	-5.89
3	ITT---345	0.976	-18.63
4	ADN--345	0.958	-31.63
5	JP---345	0.957	-34.00
6	JP---138	0.964	-39.24
7	SC---138	0.995	-38.07
8	SC----19	1.050	-34.57
9	SC--13.8	1.020	-32.73
10	ADN--138	1.003	-34.88
11	IMB--138	0.996	-36.46
12	R.L.-138	1.004	-46.23
13	CMP--138	1.002	-49.07
14	CIT--138	0.988	-49.85
16	M.M13.8A	1.030	6.65
18	M.M13.8B	1.010	4.17
19	EST--345	1.001	-0.34
20	EST-13.8	1.003	6.18
21	PC---345	0.958	-14.38

DADOS DAS LINHAS

OM	TO	IMPEDANCIA (PU)		CHARGING (PU)	CAP. (PU)
1	2	0.00000	0.00960	0.0000	12.800
2	3	0.00730	0.06530	0.9970	5.380
2	3	0.00620	0.06220	1.0430	6.040
3	4	0.00620	0.06200	1.0430	6.040
3	4	0.00720	0.06550	0.9970	5.380
4	5	0.00130	0.01250	0.2100	6.040
4	5	0.00150	0.01310	0.2010	5.380
5	6	0.00000	0.04290	0.0000	2.250
5	6	0.00000	0.04290	0.0000	2.250
5	6	0.00000	0.04290	0.0000	2.250
6	7	0.01760	0.09560	0.0270	1.080
6	7	0.01760	0.09560	0.0270	1.080
6	7	0.01760	0.09560	0.0270	1.080
6	7	0.01760	0.09560	0.0270	1.080
6	7	0.02970	0.09560	0.0270	0.690
7	8	0.00000	0.05800	0.0000	2.400
7	9	0.00000	0.10050	0.0000	2.000
4	10	0.00000	0.02020	0.0000	4.500
0	11	0.00900	0.04720	0.0140	1.080
0	11	0.00900	0.04720	0.0140	1.080
0	11	0.01340	0.04870	0.0150	0.860
0	12	0.09550	0.37820	0.1060	0.860
0	12	0.09550	0.37820	0.1060	0.860
2	13	0.06690	0.25560	0.0720	0.860
2	13	0.06690	0.25560	0.0720	0.860
3	14	0.06880	0.26290	0.0740	0.860
3	14	0.06880	0.26290	0.0740	0.860
2	21	0.00490	0.04320	0.6590	5.380
2	24	0.00490	0.04320	0.6590	5.380

4	21	0.00800	0.12020	2.0090	9.060
19	21	0.00560	0.05790	0.9690	6.040
19	21	0.00560	0.05790	0.9690	6.040
2	19	0.00420	0.04220	0.7070	6.040
2	15	0.00370	0.03300	0.5030	5.380
15	19	0.00090	0.00940	0.1580	6.040
15	16	0.00000	0.04320	0.0000	3.780
15	17	0.00000	0.06640	0.0000	1.500
17	18	0.00000	0.05960	0.0000	2.000
19	20	0.00000	0.01090	0.0000	12.000
0	19	0.01000	0.10000	0.0000	0.000

### CONFIGURACAO DO SISTEMA

AREA RETIDA

AREA EXTERNA

19 BARRAS

2 BARRAS

34 LINHAS

6 LINHAS

A INTERLIGACAO DAS AREAS E FEITA POR 4 BARRAS

AREA EXTERNA

LISTA DAS BARRAS VALENCIAS

19	3
15	4
2	2
16	2
17	2
18	2

LISTA DAS LINHAS ORDENADAS

0	19	0.0100000	0.1000000	0.0000	0.0000000
15	19	0.0009000	0.0094000	0.0000	0.0000000
2	15	0.0037000	0.0330000	0.0000	0.0000000
15	16	0.0000000	0.0432000	0.0000	0.0000000
15	17	0.0000000	0.0664000	0.0000	0.0000000
17	18	0.0000000	0.0596000	0.0000	0.0000000

AREA RETIDA

LISTA DAS BARRAS

19

2

16

18

21

20

1

3

4

5

10

6

11

12

7

13

8

9

14

LISTA DAS LINHAS ORDENADAS

2	19	0.0042000	0.0422000	0.7070	6.0400000
2	21	0.0049000	0.0432000	0.6590	5.3800000
2	21	0.0049000	0.0432000	0.6590	5.3800000
19	21	0.0056000	0.0572000	0.7690	6.0400000

19	21	0.0056000	0.0579000	0.9690	6.0400000
19	20	0.0000000	0.0109000	0.0000	12.0000000
1	2	0.0000000	0.0096000	0.0000	12.8000000
2	3	0.0073000	0.0653000	0.9970	5.3800000
2	3	0.0062000	0.0622000	1.0430	6.0400000
3	4	0.0062000	0.0620000	1.0430	6.0400000
3	4	0.0072000	0.0655000	0.9970	5.3800000
4	21	0.0080000	0.1202000	2.0090	9.0600000
4	5	0.0013000	0.0125000	0.2100	6.0400000
4	5	0.0015000	0.0131000	0.2010	5.3800000
4	10	0.0000000	0.0202000	0.0000	4.5000000
5	6	0.0000000	0.0429000	0.0000	2.2500000
5	6	0.0000000	0.0429000	0.0000	2.2500000
5	6	0.0000000	0.0429000	0.0000	2.2500000
10	11	0.0090000	0.0472000	0.0140	1.0800000
10	11	0.0090000	0.0472000	0.0140	1.0800000
10	11	0.0134000	0.0487000	0.0150	0.8600000
10	12	0.0955000	0.3782000	0.1060	0.8600000
10	12	0.0955000	0.3782000	0.1060	0.8600000
6	7	0.0176000	0.0956000	0.0270	1.0800000
6	7	0.0176000	0.0956000	0.0270	1.0800000
6	7	0.0176000	0.0956000	0.0270	1.0800000
6	7	0.0176000	0.0956000	0.0270	1.0800000
6	7	0.0297000	0.0956000	0.0270	0.6900000
12	13	0.0669000	0.2556000	0.0720	0.8600000
12	13	0.0669000	0.2556000	0.0720	0.8600000
7	8	0.0000000	0.0580000	0.0000	2.4000000
7	9	0.0000000	0.1005000	0.0000	2.0000000
13	14	0.0688000	0.2629000	0.0740	0.8600000
13	14	0.0688000	0.2629000	0.0740	0.8600000

MATRIZ ZBARRA EQUIVALENTE DA ÁPFA RETIDA

Z(	19	,	19	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	18	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	2	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	16	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	21	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	20	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	1	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	3	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	4	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	5	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	10	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	6	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	11	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	12	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	7	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	13	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	8	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	9	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	19	,	14	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	18	,	18	) = 0.010783327	0.234039040
Z(	18	,	2	) = 0.010295558	0.103260424
Z(	18	,	16	) = 0.010783327	0.108039040
Z(	18	,	21	) = 0.010166923	0.101954852
Z(	18	,	20	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	18	,	1	) = 0.010295558	0.103260424
Z(	18	,	3	) = 0.010267469	0.103034375
Z(	18	,	4	) = 0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	5	) = 0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	10	) = 0.010239557	0.102808363

Z(	18	,	6	) =0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	11	) =0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	12	) =0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	7	) =0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	13	) =0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	8	) =0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	9	) =0.010239557	0.102808363
Z(	18	,	14	) =0.010239557	0.102808363
Z(	2	,	2	) =0.011520514	0.114707538
Z(	2	,	16	) =0.010295558	0.103260424
Z(	2	,	21	) =0.010865206	0.108818782
Z(	2	,	20	) =0.010000000	0.100000000
Z(	2	,	1	) =0.011520514	0.114707538
Z(	2	,	3	) =0.011380783	0.113688283
Z(	2	,	4	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	5	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	10	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	6	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	11	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	12	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	7	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	13	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	8	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	9	) =0.011241853	0.112669182
Z(	2	,	14	) =0.011241853	0.112669182
Z(	16	,	16	) =0.010783327	0.151239040
Z(	16	,	21	) =0.010166923	0.101954852
Z(	16	,	20	) =0.010000000	0.100000000
Z(	16	,	1	) =0.010295558	0.103260424
Z(	16	,	3	) =0.010267469	0.103034375
Z(	16	,	4	) =0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	5	) =0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	10	) =0.010239557	0.102808363

Z(	16	,	6	)	=0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	11	)	=0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	12	)	=0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	7	)	=0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	13	)	=0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	8	)	=0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	9	)	=0.010239557	0.102808363
Z(	16	,	14	)	=0.010239557	0.102808363
Z(	21	,	21	)	=0.011703491	0.116879585
Z(	21	,	20	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	21	,	1	)	=0.010365206	0.108818782
Z(	21	,	3	)	=0.011046283	0.110214244
Z(	21	,	4	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	5	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	10	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	6	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	11	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	12	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	7	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	13	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	8	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	9	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	21	,	14	)	=0.011226265	0.111609489
Z(	20	,	20	)	=0.010000000	0.110900000
Z(	20	,	1	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	3	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	4	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	5	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	10	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	6	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	11	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	12	)	=0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	7	)	=0.010000000	0.100000000

Z(	20	,	13	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	8	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	9	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	20	,	14	) = 0.010000000	0.100000000
Z(	1	,	1	) = 0.011520514	0.124307538
Z(	1	,	3	) = 0.011380783	0.113688283
Z(	1	,	4	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	5	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	10	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	6	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	11	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	12	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	7	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	13	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	8	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	9	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	1	,	14	) = 0.011241853	0.112669182
Z(	3	,	3	) = 0.013946490	0.139429241
Z(	3	,	4	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	5	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	10	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	6	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	11	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	12	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	7	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	13	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	8	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	9	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	3	,	14	) = 0.013153494	0.133313839
Z(	4	,	4	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	5	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	10	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	6	) = 0.015049143	0.153954695

Z(	4	,	11	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	12	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	7	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	13	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	8	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	9	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	4	,	14	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	5	,	5	) = 0.015747164	0.160351353
Z(	5	,	10	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	5	,	6	) = 0.015747164	0.160351353
Z(	5	,	11	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	5	,	12	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	5	,	7	) = 0.015747164	0.160351353
Z(	5	,	13	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	5	,	8	) = 0.015747164	0.160351353
Z(	5	,	9	) = 0.015747164	0.160351353
Z(	5	,	14	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	10	,	10	) = 0.015049143	0.174154695
Z(	10	,	6	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	10	,	11	) = 0.015049143	0.174154695
Z(	10	,	12	) = 0.015049143	0.174154695
Z(	10	,	7	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	10	,	13	) = 0.015049143	0.174154695
Z(	10	,	8	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	10	,	9	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	10	,	14	) = 0.015049143	0.174154695
Z(	6	,	6	) = 0.015747164	0.174651353
Z(	6	,	11	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	6	,	12	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	6	,	7	) = 0.015747164	0.174651353
Z(	6	,	13	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	6	,	8	) = 0.015747164	0.174651353
Z(	6	,	9	) = 0.015747164	0.174651353

Z(	6	,	14	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	11	,	11	) = 0.018512783	0.190074739
Z(	11	,	12	) = 0.015049143	0.174154695
Z(	11	,	7	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	11	,	13	) = 0.015049143	0.174154695
Z(	11	,	8	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	11	,	9	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	11	,	14	) = 0.015049143	0.174154695
Z(	12	,	12	) = 0.062799143	0.363254695
Z(	12	,	7	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	12	,	13	) = 0.062799143	0.363254695
Z(	12	,	8	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	12	,	9	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	12	,	14	) = 0.062799143	0.363254695
Z(	7	,	7	) = 0.019738233	0.193816671
Z(	7	,	13	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	7	,	8	) = 0.019738233	0.193816671
Z(	7	,	9	) = 0.019738233	0.193816671
Z(	7	,	14	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	13	,	13	) = 0.096249143	0.491054695
Z(	13	,	8	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	13	,	9	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	13	,	14	) = 0.096249143	0.491054695
Z(	8	,	8	) = 0.019738233	0.251916671
Z(	8	,	9	) = 0.019738233	0.193816671
Z(	8	,	14	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	9	,	9	) = 0.019738233	0.294316671
Z(	9	,	14	) = 0.015049143	0.153954695
Z(	14	,	14	) = 0.130649143	0.622504695

ORDENACAO DAS BARRAS NA MATRIZ ZBARRA

NA MATRIZ	NUMERO	NOME	MOD. TENSÃO (PU)	FASE (GRAUS)
1	19	EST--345	1.001	-0.34
2	18	M.M13.8B	1.010	4.17
3	2	FUR--345	0.999	-5.89
4	16	M.M13.8A	1.030	6.65
5	21	PC---345	0.958	-14.38
6	20	EST-13.8	1.003	6.18
7	1	FUR---15	1.005	0.01
8	3	ITT--345	0.976	-18.63
9	4	ADN--345	0.958	-31.63
0	5	JP---345	0.957	-34.00
1	10	ADN--138	1.008	-34.88
2	6	JP---138	0.964	-39.2
3	11	IMB--138	0.996	-36.46
4	12	R.L.-138	1.004	-46.28
5	7	SC---138	0.995	-38.07
6	13	CMP--138	1.002	-49.07
7	8	SC----19	1.050	-34.57
8	9	SC--13.8	1.020	-32.73
9	14	CIT--138	0.988	-49.85

BARRA CONECTADA A REFERENCIA E EST--345

A IMPEDANCIA DO TIE E 0.010000 0.100000 PU

A N E X O    I I I

- *Listagem do Programa de Cálculo de Contingências*

PROGRAMA DE CALCULO DE CONTINGENCIAS

CASOS TESTE :

- PERDA DE UM CIRCUITO FURNAS-ITUTINGA 345KV
- PERDA DE UM CIRCUITO R.LEAD-CAMPOS 138KV
- PERDA SIMULTANEA DE R.LEAD-CAMPOS 138KV E  
CAMPOS-CACHOEIRA 138KV
- ADICAO DE UM CIRCUITO ADRIANO-IMBARIE 138KV

ASO TESTE 1 - PERDA DE UM CIRCUITO FURNAS-ITUTINGA 345 KV

MODIFICACOES DAS LINHAS DO SISTEMA.

TIRADA LINHA ENTRE AS BARRAS 2 E 3 COM Z = , 0.0073 0.0653 PU

LINHAS ONDE VERIFICAREMOS O CARREGAMENTO

LADO F	LADO T		
FUR--345	ITT--345	1	CIRCUITOS
ADN--345	PC---345	1	CIRCUITOS

BARRAS ONDE QUEREMOS EXAMINAR AS TENSOES

FUR--345  
ITT--345  
ADN--345  
JP---345  
JP---138  
ADN--138  
IMB--138

CASO TESTE 1 - PERDA DE UM CIRCUITO FURNAS-ITUTINGA 345 KV

CIRCUITO	LINHA FUR--345		ITT--345	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I=	3.505PU 58.% CAP.	I=	5.967PU 99.% CAP.

CIRCUITO	LINHA ADN--345		PC---345	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I=	2.370PU 26.% CAP.	I=	3.292PU 36.% CAP.

CASO TESTE 1 - PERDA DE UM CIRCUITO FURNAS-ITUTINGA 345 KV

BARRA	TENSAO ANTES	TENSAO DEPOIS	FASE ANTES	FASE DEPOIS
--345	0.999 PU	0.989 PU	-5.89	-5.83
--345	0.976 PU	0.833 PU	-18.63	-25.83
--345	0.958 PU	0.876 PU	-31.53	-35.82
--345	0.957 PU	0.874 PU	-34.00	-37.61
--138	0.964 PU	0.875 PU	-39.24	-41.68
--138	1.008 PU	0.920 PU	-34.88	-37.24
--138	0.996 PU	0.908 PU	-36.46	-37.46

BARRA TOMADA COMO BASE NO CALCULO DAS TENSOES E FUR---15

CASO TESTE 2 - PERDA DE UM CIRCUITO R. LEAO-CAMPOS 138 KV

MODIFICACOES DAS LINHAS DO SISTEMA

ETIRADA LINHA ENTRE AS BARRAS 12 E 13 COM Z = 0.0669 0.25

LINHAS ONDE VERIFICAREMOS O CARREGAMENTO

LADO F	LADO T		
ADN--138	R.L.--138	2	CIRCUITOS
R.L.--138	CMP--138	1	CIRCUITOS
CMP--138	CIT--138	2	CIRCUITOS

BARRAS ONDE QUEREMOS EXAMINAR AS TENSOES

ADN--138  
IMB--138  
R.L.--138  
CMP--138  
CIT--138

CASO TESTE 2 - PERDA DE UM CIRCUITO R.LEAO-CAMPOS 138 KV

CIRCUITO	LINHA ADN--138		R.L.-138	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I=	0.522PU 61.% CAP.	I=	0.522PU 61.% CAP.
2	I=	0.522PU 61.% CAP.	I=	0.522PU 61.% CAP.

CIRCUITO	LINHA R.L.-138		CMP--138	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I=	0.195PU 23.% CAP.	I=	0.379PU 44.% CAP.

CIRCUITO	LINHA CMP--138		CIT--139	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I=	0.060PU 7.% CAP.	I=	0.070PU 8.% CAP.
2	I=	0.060PU 7.% CAP.	I=	0.070PU 8.% CAP.

CASO TESTE 2 - PERDA DE UM CIRCUITO R. LEAO-CAMPOS 138 KV

BARRA	TENSÃO ANTES	TENSÃO DEPOIS	FASE ANTES	FASE DEPOIS
--138	1.008 PU	1.004 PU	-34.88	-34.70
--138	0.996 PU	0.992 PU	-36.46	-36.23
.-138	1.004 PU	0.994 PU	-46.28	-45.37
--138	1.002 PU	0.862 PU	-49.07	-59.53
--138	0.988 PU	0.878 PU	-49.85	-57.06

BARRA TOMADA COMO BASE NO CALCULO DAS TENSÕES E FUR---15

CASO TESTE 2 COM ADRIANO 345 KV COMO 'FIXED VOLTAGE BUS'

BARRA	TENSÃO ANTES	TENSÃO DEPOIS	FASE ANTES	FASE DEPOIS
--138	1.008 PU	1.007 PU	-34.88	-34.88
--138	0.996 PU	0.994 PU	-36.46	-36.43
--138	1.004 PU	0.990 PU	-46.28	-45.86
--138	1.002 PU	0.964 PU	-49.07	-54.64
--138	0.988 PU	0.944 PU	-49.85	-53.37

BARRA TOMADA COMO BASE NO CALCULO DAS TENSÕES E ADM--345

TESTE 3 - PERDA DE R.LEAD-CAMPOS 138 KV E CAMPOS-CACHOEIRO 138 KV

MODIFICACOES DAS LINHAS DO SISTEMA

PRADA LINHA ENTRE AS BARRAS	12 E	13 COM Z =	0.0669	0.2556 PU
PRADA LINHA ENTRE AS BARRAS	13 E	14 COM Z =	0.0688	0.2629 pU

LINHAS ONDE VERIFICAREMOS O CARREGAMENTO

LADO F	LADO T		
ADN--138	R.L.-138	2	CIRCUITOS
R.L.-138	CMP--138	1	CIRCUITOS
CMP--138	CIT--138	1	CIRCUITOS

BARRAS ONDE QUEREMOS EXAMINAR AS TENSOES

ADN--138

IMB--138

R.L.-138

CMP--138

CIT--138

ASO TESTE 3 - PERDA DE R.LEAO-CAMPOS 138 KV E CAMPOS-CACHOEIRO 138 KV

CIRCUITO	LINHA ADN--138		R.L.--138	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I=	0.522PU 61.% CAP.	I=	0.522PU 61.% CAP.
2	I=	0.522PU 61.% CAP.	I=	0.522PU 61.% CAP.

CIRCUITO	LINHA R.L.--138		CMP--138	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I=	0.195PU 23.% CAP.	I=	0.379PU 44.% CAP.

CIRCUITO	LINHA CMP--138		CIT--138	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I=	0.060PU 7.% CAP.	I=	0.140PU 16.% CAP.

CASO TESTE 3 - PERDA DE R. LEAD-CAMPOS 138 KV E CAMPOS-CACHOEIRO 138 KV

RPA	TENSÃO ANTES	TENSÃO DEPOIS	FASE ANTES	FASE DEPOIS
--138	1.008 PU	1.000 PU	-34.88	-34.53
--138	0.996 PU	0.987 PU	-36.46	-36.01
.-138	1.004 PU	0.983 PU	-46.28	-44.49
--138	1.002 PU	0.853 PU	-49.07	-57.72
--138	0.988 PU	0.775 PU	-49.85	-62.10

BARRA TOMADA COMO BASE NO CALCULO DAS TENSÕES E FUR---15

CASO TESTE 3 COM ADRIANO 345 KV COMO 'FIXED VOLTAGE BUS'

BARRA	TENSAO ANTES	TENSAO DEPOIS	FASE ANTES	FASE DE
--138	1.008 PU	1.005 PU	-34.88	-34.8
--138	0.996 PU	0.991 PU	-36.46	-36.41
.-138	1.004 PU	0.976 PU	-46.28	-45.47
--138	1.002 PU	0.937 PU	-49.07	-53.45
--138	0.988 PU	0.887 PU	-49.85	-56.05

BARRA TOMADA COMO BASE NO CALCULO DAS TENSOES E ADN--345

CASO TESTE 4 - ADICAO DE UM CIRCUITO ADRIANO-IMBARIE 138 KV

MODIFICACOES DAS LINHAS DO SISTEMA

ADICIONADA LINHA ENTRE AS BARRAS 10 E 11

$Z = 0.00900 + j0.04720$  PU

$Y = 0.01400$  PU

CAP. CORRENTE = 1.0800 PU

LINHAS ONDE VERIFICAREMOS O CARREGAMENTO

LADO F

LADO T

ADN--138

IMB--138

4 CIRCUITOS

BARRAS ONDE QUEREMOS EXAMINAR AS TENSÕES

ADN--138

IMB--138

R.L.-138

CMP--138

CASO TESTE 4 - ADICAO DE UM CIRCUITO ADRIANO-IMBARIE 138 KV

CIRCUITO	LINHA ADN--138		IMB--138	
	ANTES DA CONTINGENCIA		APOS A CONTINGENCIA	
1	I= 0.624PU	58.% CAP.	I= 0.467PU	43.% CAP.
2	I= 0.624PU	58.% CAP.	I= 0.467PU	43.% CAP.
3	I= 0.594PU	69.% CAP.	I= 0.445PU	52.% CAP.
4	I= 0.000PU	0.% CAP.	I= 0.467PU	43.% CAP.

ASO TESTE 4 - ADICAO DE UM CIRCUITO ADRIANO-IMBARIE 138 KV

RA	TENSAO ANTES	TENSAO DEPOIS	FASE ANTES	FASE DEPOIS
-138	1.003 PU	1.009 PU	-34.88	-34.92
-138	0.996 PU	1.010 PU	-36.46	-35.02
-138	1.004 PU	1.006 PU	-46.28	-46.46
-138	1.002 PU	1.004 PU	-49.07	-49.36

ARRA TOMADA COMO BASE DO CALCULO DAS TENSOES E FUR---15

CASO TESTE 4 COM ADRIANO 345 KV COMO 'FIXED VOLTAGE BUS'

BARRA	TENSAO ANTES	TENSAO DEPOIS	FASE ANTES	FASE DEPO
DN--138	1.008 PU	1.009 PU	-34.88	-34.89
MB--138	0.996 PU	0.994 PU	-36.46	-35.87
L.-138	1.004 PU	1.007 PU	-46.28	-46.37
MP--138	1.002 PU	1.006 PU	-49.07	-49.23

BARRA TOMADA COMO BASE NO CALCULO DAS TENSOES E ADN--345

