

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

FUJIO SATO

Orientador: Alcir José Monticelli

Tese de Mestrado apresentada à  
Faculdade de Engenharia da Uni  
versidade Estadual de Campinas

MARÇO - 1979

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e em especial

a Alcir José Monticelli pelo incentivo e preciosa orientação,

aos colegas Ariovaldo Verândio Garcia, Sigmar Maurer Deckmann e Carlos Alberto F. Murari pelas discussões, sugestões e valiosa colaboração prestada,

ao Departamento de Engenharia Elétrica da FEC, à Diretoria da Cia. Paulista de Força e Luz (CPFL) e às chefias dos órgãos desta empresa que permitiram o desenvolvimento deste trabalho,

às Srtas. Elza Aoki pelo trabalho datilográfico e Edna Pfeifer pela orientação na organização das referências bibliográficas,

ao colega Heitor Momesso pela execução dos desenhos.

### RESUMO

Este trabalho apresenta dois métodos para cálculo de curto-circuito em sistemas de potência, ambos usando técnicas de matriz esparsa: o primeiro usa o algoritmo para a formação de matriz de impedância nodal esparsa e o segundo baseia-se no método de fatoração da matriz de admitância nodal.

Foram testadas técnicas de incorporar os acoplamentos mútuos na matriz de admitância nodal.

Os métodos foram verificados testando-se em 7 sistemas.

### ABSTRACT

This work presents two methods for short-circuit calculation in power systems, both using sparse matrix techniques: the first uses the sparse bus impedance matrix formation algorithm and the second is based on the bus admittance matrix factorization method.

Techniques of incorporating mutual couplings in the bus admittance matrix have been tested.

The methods have been verified by simulation on 7 test-systems.

## ÍNDICE

### CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO.....	1
-----------------	---

### CAPÍTULO II

APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	3
2.1. Falhas em sistemas de potência.....	3
2.2. Equipamentos de proteção.....	4
2.2.1. Disjuntores.....	5
2.2.2. Redutores de medidas.....	6
2.2.3. Relés de proteção.....	6
2.3. Simulação de curto-circuito em sistema de potência...	6
2.3.1. Hipóteses simplificadoras.....	7
2.3.2. Evolução dos métodos de simulação.....	8
2.3.2.1. Métodos analógicos - Histórico.....	8
2.3.2.2. Métodos digitais - Histórico.....	11
2.3.2.3. Métodos das matrizes nodais.....	13
a. Método da matriz $Z_{\text{BARRA}}$ .....	14
b. Método da matriz $Y_{\text{BARRA}}$ fatorada..	15
c. Método da matriz $Z_{\text{BARRA}}$ esparsa..	17
2.3.3. Acoplamentos mútuos.....	19
2.3.4. Tipos de simulações e grandezas calculadas....	21

### CAPÍTULO III

ASPECTOS TEÓRICOS CONSIDERADOS NA ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO.....	23
3.1. Modelagem da rede para análise de curto-circuito.....	23
3.2. Curto-circuito trifásico.....	28
3.3. Curto-circuito à terra.....	29
3.3.1. Método das componentes simétricas.....	29
3.3.2. Acoplamentos mútuos em linhas de transmissão..	34
3.3.3. Curto-circuito monofásico.....	40
3.4. Métodos das matrizes esparsas.....	45

3.5. Tratamento das indutâncias mútuas na rede de sequência zero pelo método de compensação.....	47
3.6. Simulações de abertura de uma linha e curto-circuito em fim de linha.....	53
3.6.1. Abertura de uma linha.....	54
3.6.2. Curto-circuito em fim de linha.....	56
3.6.3. Uma complicação adicional no estudo de condição linha aberta.....	58

#### CAPÍTULO IV

TESTES E RESULTADOS.....	60
4.1. Introdução.....	60
4.2. Descrição das redes testadas.....	60
4.3. Resultados.....	73

#### CAPÍTULO V

CONCLUSÕES.....	100
-----------------	-----

#### APÊNDICE A

TRANSFORMAÇÕES DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS NA ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO.....	102
A.1. Propriedades das transformações das componentes simétricas.....	102
A.2. Conexão das redes de seqüências para simulação de curto-circuito .....	106

#### APÊNDICE B

MÉTODOS DAS MATRIZES ESPARSAS.....	110
B.1. Eliminação de Gauss.....	110
B.2. Decomposição LDU.....	110
B.3. Método de bi-fatoração.....	113
B.4. Método da matriz $Y_{BARRA}$ fatorada.....	114
B.5. Método da matriz $Z_{BARRA}$ esparsa.....	114
B.6. Armazenamento compacto.....	116

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A análise de curto-circuito é imprescindível tanto no planejamento como na operação de um sistema de potência. Muitas vezes são tomadas decisões, não só técnicas como econômicas, baseadas nos resultados dessa análise.

A expansão das redes elétricas e o surgimento de novas interligações entre as várias empresas, tornando o sistema altamente interligado traz dificuldades computacionais, mesmo em computadores de grande porte. Pensando-se principalmente nesse problema é que foi desenvolvido este trabalho, em que se utilizam as técnicas de esparsidade aplicadas ao problema do cálculo de curto circuito.

No Capítulo II são apresentados alguns aspectos referentes à proteção de sistema elétrico de potência e a evolução dos métodos de simulação de curto-circuito, desde os primeiros métodos utilizados até os métodos atuais.

No Capítulo III são descritos a modelagem da rede para análise de curto-circuito, curto-circuitos trifásico e à terra, método das componentes simétricas e o tratamento de indutâncias mútuas na rede de sequência zero. É apresentada também a análise de contingências (condições linha aberta e curto-circuito em fim de linha).

No Capítulo IV mostram-se os testes efetuados em 7 redes, sendo 4 delas sistemas reais da região sudeste do Brasil. Deve-se salientar que todas as redes testadas apresentam grupos de linhas com mútuas.

No Capítulo V estão as conclusões.

No Apêndice A é apresentada a conexão das redes de seqüências para simulação de curto-circuito, deduzida a partir

das propriedades das transformações de componentes simétricas.

No Apêndice B apresenta-se os métodos das matrizes esparsas, iniciando com as técnicas de eliminação de Gauss, decomposição LDU e método de bi-fatoração.

No Apêndice C aborda-se de uma outra forma a obtenção do circuito equivalente de grupos de linhas com acoplamentos mútuos.

No Apêndice D são deduzidos os algoritmos que calculam as condições linha aberta e curto em fim de linha tanto para as linhas sem acoplamentos mútuos como as que se apresentam mutuamente acopladas.

No Apêndice E descreve-se a solução encontrada para recalcular a matriz de admitância primitiva  $Y_{pri}$  de um grupo de linhas mutuamente acopladas quando é simulada a condição linha aberta em uma linha desse grupo. A fórmula de Woodbury foi utilizada para essa finalidade.



## CAPÍTULO II

### APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

#### 2.1. Falhas em sistemas de potência

O uso extensivo da energia elétrica em praticamente todos os ramos de atividade tornou a confiabilidade de operação de um sistema elétrico de potência um problema de grande importância.

Um sistema de potência está sujeito a distúrbios em operação normal ou aparecimento de falhas em qualquer um de seus componentes.

A forma mais comum de distúrbio em operação normal é a sobrecarga, ou seja, o fluxo de corrente (ou MVA) em um determinado equipamento excede o seu valor nominal.

O tipo de falha mais comum e também o mais severo é o curto-circuito, decorrente da ruptura de isolamento entre um condutor de uma fase e terra ou entre fases. A magnitude da corrente de curto-circuito depende de vários fatores, tais como: tipo de curto-circuito, capacidade do sistema de geração, topologia do sistema, método de conexão e operação dos neutros dos transformadores, distância elétrica da falha em relação às unidades geradoras, etc.

A corrente de curto-circuito excede consideravelmente a corrente nominal do equipamento afetado, podendo trazer danos materiais e distúrbios na operação normal do sistema. De fato, o curto-circuito pode não só danificar equipamentos, mas causar também consideráveis quedas na tensão e na frequência, provocando instabilidade no sistema de potência.

O alto grau de interligação e interdependência entre os vários elementos de um sistema elétrico de potência e suas

condições de operação criam a necessidade de sistemas de proteção que atuem automaticamente, desconectando com rapidez a parte afetada do sistema [44].

## 2.2. Equipamentos de proteção

Na ocorrência de curto-circuito é necessário que a parte atingida seja isolada tão rapidamente quanto possível do restante do sistema, para evitar danos materiais e o envolvimento de partes não atingidas.

Esta tarefa é desempenhada pelo conjunto de equipamentos composto por disjuntores, redutores de medidas e relês de proteção. O diagrama unifilar simplificado da Fig. - 2.1 representa este conjunto.

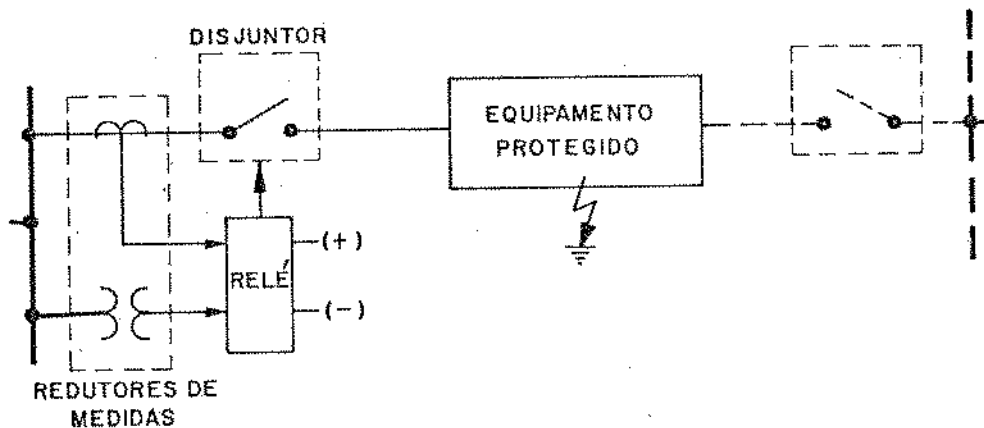


Fig. 2.1 Conjunto de equipamentos de proteção.

Esquemáticamente, a atuação do sistema de proteção pode ser representada como mostra a Fig. - 2.2, onde um sistema de decisões lógicas (que tanto pode ser um conjunto de relês como um microprocessador) se utiliza de medidas analógicas (TC's e/ou TP's) e atua no sistema de potência através de um controlador (disjuntores).

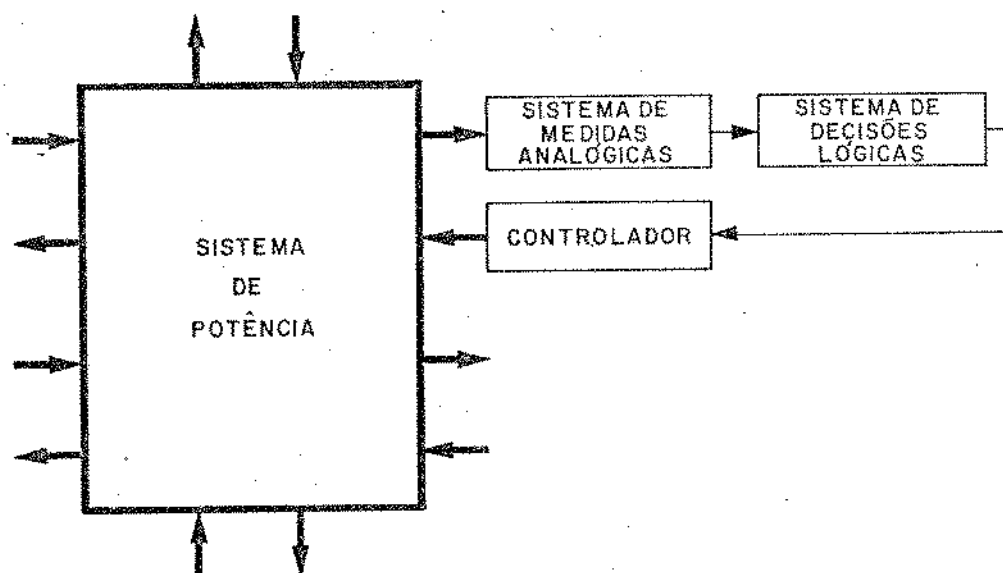


Fig. 2.2 Elementos básicos de um sistema de proteção.

#### 2.2.1. Disjuntores

A abertura da parte defeituosa de um sistema de potência, interrompendo correntes várias vezes superior aos valores nominais em questão de milisegundos, é executada pelo disjuntor. A evolução na velocidade de abertura dos contatos dos disjuntores permite que atualmente operem na faixa de 1 a 2 ciclos (base de 60 hertz).

### 2.2.2. Redutores de medidas

São transformadores especiais, de corrente e tensão, que têm a função de isolar as bobinas dos relés e instrumentos em geral, da alta tensão, além de padronizar os valores secundários.

### 2.2.3. Relés de proteção

A função dos relés de proteção é, baseando-se em dados do sistema, comandar a operação dos disjuntores.

Do ponto de vista de uma empresa concessionária os relés representam um papel preponderante na segurança de seus equipamentos. Para o consumidor um serviço de boa qualidade depende mais de um releamento adequado do que de qualquer outro fator.

Paralelamente à evolução na velocidade de abertura dos disjuntores seguiu-se a dos relés; atualmente relés de alta-velocidade operam na faixa de 1 a 3 ciclos (base de 60 hertz).

As proteções adequadas de vários componentes de um sistema elétrico de potência são executadas pela aplicação de um conjunto coerente de relés, e a decisão de quais devem ser os ajustes depende do conhecimento dos valores das correntes de curto-circuitos. Estes valores são determinados através da análise computacional de curto-circuitos, que será tratada a seguir.

## 2.3. Simulação de curto-circuito em sistema de potência

O conhecimento dos valores de curto-circuitos numa

rede elétrica é necessário para estudos de alguns assuntos, tais como |4| :

- determinação da capacidade de interrupção dos equipamentos de chaveamento;
- cálculo de ajustes do sistema de proteção;
- seleção de reatores limitadores de corrente e outros equipamentos;
- cálculo do esforço mecânico nos elementos estruturais dos equipamentos sujeitos às forças eletromagnéticas devida à corrente de curto-circuito.

#### 2.3.1. Hipóteses simplificadoras

Nas simulações de curto-circuitos adotam-se certas simplificações na modelagem da rede elétrica, que facilitam sobre-maneira os processos computacionais sem, no entanto, introduzir erros consideráveis nos valores calculados.

As simplificações adotadas são:

- todas as máquinas síncronas do sistema operando com as tensões 1.0 pu  $\angle 0^\circ$  ;
- os parâmetros "shunt" das linhas são desprezados ;
- as cargas são desprezadas ;
- consideram-se todos os transformadores operando na derivação nominal;
- considera-se a rede de sequência negativa idêntica à rede de sequência positiva.

Além dessas hipóteses, há de se considerar certos fatores cujas indeterminações decorrem do próprio tipo de problema, tais como:

- curto-circuito sólido;
- simula-se somente a alternativa de geração máxima dada a dificuldade de se prever a configuração de geração mínima;
- as impedâncias de sequência zero (próprias e mútuas) em linhas de transmissão são parâmetros muito aproximados, pelo fato de serem função da resistividade do solo.

### 2.3.2. Evolução dos métodos de simulação

#### 2.3.2.1 Métodos analógicos - Histórico

A análise do comportamento de um sistema de potência sob várias condições requer numerosas soluções extremamente laboriosas e na maioria dos casos impossíveis de serem obtidas por cálculos manuais [5].

Este tipo de dificuldade fez com que se recorresse a métodos experimentais. As primeiras simulações, de um sistema particular, conforme a Ref. [1] de 1.917, utilizavam-se de três métodos experimentais, com representações trifásicas, para análise dos problemas ligados a um sistema de transmissão de energia elétrica: primeiro, usando-se o sistema real; segundo, usando uma linha experimental; e terceiro, uma linha artificial. Por uma linha experimental entende-se uma linha do mesmo tipo de construção da real em escala reduzida. No método da linha artificial os parâmetros do sistema real são representados por resistores, reatores e capacitores.

res (parâmetros concentrados).

O primeiro método por retratar fielmente os fenômenos a serem analisados, apresentava resultados ideais. Entretanto, na maioria dos casos o seu emprego era impraticável por apresentar inconvenientes, tais como: necessidade de se efetuarem observações simultâneas em vários pontos do sistema, demandando tempo e pessoal; possibilidade de provocar danos em equipamentos; necessidade da interrupção dos consumidores; e a possibilidade de o sistema adquirir configurações não desejadas para a análise, devidas a aberturas indesejadas de disjuntores.

O método da linha experimental possibilitava a análise das características dos isoladores, perdas por efeito corona e problemas similares, porém era impossível o seu emprego nos estudos de sobretensão, quedas de tensão e outros fenômenos inerentes às linhas longas.

O terceiro método, o da linha artificial, por apresentar vantagens sobre os outros, foi o mais difundido e muitos sistemas artificiais foram construídos na época.

Para o estudo de curto-circuitos, por esse método, simulavam-se várias condições, nas quais as correntes e as tensões nos diferentes pontos eram registrados em oscilogramas e analisados posteriormente [1]. Este método também conhecido como modelo miniatura, evoluiu para possibilitar a obtenção das soluções dos problemas de sistemas de potência, tais como: determinação das divisões das correntes devidas às cargas normais (fluxo de

carga); curto-circuitos; estabilidade de máquinas síncronas e de indução [3].

Na época utilizava-se também o modelo miniatura em corrente contínua (d.c. short-circuit calculating table), que em parte veio resolver os problemas apresentados nos primeiros modelos em corrente alternada, que eram: necessidade de resistores e reatores; e a limitação de instrumentos de corrente alternada de baixa escala [4]. Este modelo, entretanto, era restrito aos problemas em cujas resoluções não se requeriam ângulos de fase e além disso impossibilitava a representação de circuitos com indutâncias mútuas de seqüência zero.

Da evolução do terceiro método, surgiu o analisador de circuito em corrente alternada (a.c. network analyser) cuja característica principal era a modelagem monofásica [5] para sistema trifásico e, no caso de estudo de condições desequilibradas, possibilitava a aplicação de coordenadas simétricas [2]. Este dispositivo era utilizado também para estudos de sistemas não-elétricos, só que nestes casos as suas variáveis precisavam ser convertidas em grandezas elétricas.

Historicamente, é interessante citar a Ref. [7], na qual se sugere a simulação de curto-circuito e outras análises em sistemas de potência por meio de computador analógico.

O analisador de circuito foi extensivamente utilizado até o advento do computador digital que veio substituí-lo, principalmente pela disponibilidade, rapidez, precisão e economia.



### 2.3.2.2 Métodos digitais - Histórico

O primeiro método computacional aplicado a sistemas de potência foi em 1.946 [14], na solução de fluxo de carga formulado por equações de malhas, cujo processo automatizava simplesmente os métodos manuais já existentes. Em certos estudos era necessária a obtenção de alguns resultados pelo analisador de circuito c.a., para introduzi-los no computador digital como dados do problema, necessitando desta forma a intervenção humana durante o processo [8]. A evolução da ciência de computação e o aparecimento de computadores digitais de alta velocidade, trouxe muitas vantagens sobre o método analógico, tornando bastante atrativo o desenvolvimento de métodos computacionais aplicados ao estudo de sistemas de potência.

O primeiro passo na análise de um sistema de potência é o desenvolvimento de modelos matemáticos, que devem descrever as características individuais dos componentes da rede, assim como as relações decorrentes das suas interligações [26]. A aplicação da notação matricial para representar as equações algébricas da rede elétrica permitiu a sistematização de problemas complexos tornando possível a utilização do computador digital.

Num sistema de potência, as características individuais de cada elemento podem ser representadas pela matriz primitiva que, no entanto, não fornece nenhuma informação a respeito do sistema interligado. Portanto, para descrever o comportamento do sistema é

necessário obter a matriz da rede pela transformação da matriz primitiva. Esta transformação é feita pela matriz de incidência. Para alguns tipos de matrizes, existem algoritmos especiais que possibilitam a sua obtenção diretamente a partir dos dados da rede. Para outros tipos, os cálculos podem ser muito trabalhosos [26].

O sucesso do método de fluxo de carga utilizando um método iterativo e formulado através de equações nodais [9], encorajou a sua aplicação também para a análise de curto-circuito [10]. Neste procedimento, um sistema de equações algébricas lineares é resolvido por um método do tipo Gauss-Seidel, com aceleração.

Na Ref. [10], em particular, não está incluído o efeito das impedâncias mútuas de sequência zero nas equações do sistema.

Os trabalhos que se seguiram, para resoluções de problemas de curto-circuitos, alguns já incluindo o efeito das indutâncias mútuas, se alternaram em formulações por malhas e formulações nodais, cada qual apresentando as suas vantagens [12, 13, 14 e 15]. Entretanto, esses métodos eram eficientes somente para resoluções de sistemas pequenos. Para sistemas com grandes dimensões apresentavam dificuldades, tais como: determinação das equações independentes e inversão de matrizes para método das malhas [14]; e problema de convergência do processo iterativo quando se utilizavam métodos do tipo Gauss-Seidel.

### 2.3.2.3 Método das matrizes nodais

Após a modelagem conveniente da rede de um sistema de potência (Cap. III), a simulação de curto-circuito consiste em resolver o sistema de equações algébricas lineares

$$\underline{Y}_{\text{BARRA}} \underline{E} = \underline{I} \quad (2.1)$$

onde

$\underline{Y}_{\text{BARRA}}$  - matriz de admitância nodal

$\underline{E}$  - vetor tensão nodal

$\underline{I}$  - vetor corrente nodal

A solução do sistema de equações (2.1) é dada por:

$$\underline{Z}_{\text{BARRA}} \underline{I} = \underline{E} \quad (2.2)$$

onde

$\underline{Z}_{\text{BARRA}}$  - matriz de impedância nodal

Obter a solução, pela inversão direta de uma matriz  $N \times N$  requer operações proporcionais a  $N^3$  [18], o que torna este método impraticável para sistemas grandes.

Antes da introdução do computador digital no cálculo de curto-circuito, os elementos da matriz  $\underline{Z}_{\text{BARRA}}$  - impedâncias de ponto e de transferência - eram determinados por métodos analógicos. O primeiro método a ser tentado com computador digital consistiu simplesmente em se automatizar o procedimento que já era utilizado com o analisador de circuito. Este tipo de procedimento foi apresentado nas Refs. [8 e 11].

a. Método da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$

O método de obtenção da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ , também chamada de matriz de curto-circuito, consiste em se formar a matriz passo a passo, simulando-se a própria construção da rede, a partir do nó de referência, acrescentando-se uma linha por vez [17 e 38].

Parte-se da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  de um sistema de dimensão unitária e, através de modificações sequenciais, obtém-se a matriz do sistema completo. Este algoritmo exige uma ordenação prévia das impedâncias da rede, o que garante a conexidade do sistema em qualquer estágio da formação da matriz, e desta forma evitam-se problemas de singularidade das matrizes  $Z_{\text{BARRA}}$  parciais, que aparecem no processo de construção.

A formação da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ , por esse método, tem rotinas distintas, para os três tipos de linhas a serem incluídas na rede, que são:

1. linha que conecta a barra de referência a uma nova barra;
2. linha que conecta uma barra já incluída a uma nova barra;
3. linha que conecta duas barras já incluídas (linha que fecha uma malha).

Imediatamente após a inclusão de uma linha do tipo 3 a linha e a coluna da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  parcial geradas pela rotina correspondente, são eliminadas pela redução de Kron, que recalcula todos os elementos da matriz.

Muitos programas de curto-circuito em uso atualmente utilizam-se deste procedimento na formação da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ .

A matriz de impedância nodal obtida por esse método é cheia. Tal característica traz limitação no seu armazenamento para grandes sistemas. De certa forma, esta restrição foi sanada pela técnica de eliminação de eixos [24], que consiste em se eliminar os nós do sistema que não interessam do ponto de vista do cálculo de curto-circuito.

Trabalha-se desta forma com matrizes de dimensões menores. Entretanto, o processo de eliminação de eixos, como apresentado em [24], exige um tempo de computação que pode ser excessivo quando a parte do sistema que se quer eliminar tem dimensão elevada.

b. Método da matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  - fatorada

O método da eliminação de Gauss pode ser utilizado na resolução de equações algébricas lineares, do tipo (2.1).

A eliminação de Gauss foi utilizada para resolução de problemas do fluxo de carga pela primeira vez na Ref. [21], não tendo sido aceito inteiramente, pois os resultados do primeiro teste mostraram que as necessidades de tempo e memória aumentavam excessivamente com o tamanho do sistema. O êxito desse método só foi alcançado quando foi adaptado às técnicas de matri-

zes esparsas [22 e 23].

Em sistemas de potência certas matrizes dos coeficientes são esparsas.

Entre elas está a matriz de admitância nodal  $Y_{\text{BARRA}}$ . A sua esparsidade advém do fato de uma barra estar ligada diretamente a uma pequena fração do número total de barras do sistema. Normalmente, quanto maior o sistema menor será esta fração, o que significa que o grau de esparsidade cresce com o número de barras.

Seja um sistema composto por  $N$  barras e  $M$  linhas. A matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  dessa rede terá  $N^2 - N - 2M$  elementos nulos. Portanto, o percentual de elementos nulos em relação à dimensão da matriz (grau de esparsidade) será:

$$GE = \frac{N^2 - N - 2M}{N^2} \cdot 100\%$$

A tabela dada a seguir ilustra o grau de esparsidade em função do tamanho do sistema, para três casos:

N	M	GE
10	20	50%
100	200	95%
1000	2000	99.5%

Técnicas de fatoração triangular de matrizes esparsas podem ser utilizadas com

eficiência no cálculo de curto circuito, mesmo para sistemas de grandes dimensões [35].

A simulação de um curto-circuito trifásico na barra  $k$  de um sistema exige apenas o conhecimento dos elementos da coluna  $k$  da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ ; tendo-se esses elementos, podem ser calculadas as tensões e contribuições para vizinhanças de qualquer ordem. A coluna  $k$  da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  pode ser obtida resolvendo-se o sistema (2.1), a partir dos fatores triangulares esparsos da matriz  $Y_{\text{BARRA}}$ , tomando-se como vetor independente

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ \\ k-1 \\ k \\ k+1 \\ \\ n \end{matrix}$$

em que o único elemento não nulo corresponde à barra curto-circuitada.

Na simulação de curto-circuito monofásico na barra  $k$ , pode ser necessário o conhecimento de outras colunas da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ , além da coluna  $k$ , que são obtidas pelo mesmo processo descrito anteriormente.

#### c. Método da matriz $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa

Quando é simulado um curto-circuito

em uma barra do sistema, as determinações das tensões nodais e as contribuições de primeira vizinhança não exigem o conhecimento completo da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ . Este fato motivou o estudo de técnicas especiais [35 e 37] de obtenção seletiva de elementos da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  a partir do conhecimento da forma fatorada da matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  (decomposição LU).

A matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa é formada pelos próprios elementos da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  das posições onde existem elementos não nulos da matriz  $Y_{\text{BARRA}}$ .

Os elementos da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa são armazenados de forma compacta, da mesma maneira que a matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  e seus fatores triangulares.

As informações contidas na matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa são suficientes para se determinar as tensões nas barras adjacentes à barra curto-circuitada bem como as contribuições de primeira vizinhança. Quando é necessária a determinação de contribuição de ordem superior o método da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa pode continuar a ser utilizado, desde que se criem ligações fictícias (de impedância elevada) entre cada barra que se deseja estudar o curto e sua vizinhança de ordem superior.

O método da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa é vantajoso no cálculo de curto-circuito trifásico quando só são exigidas contribuições de primeira, e eventualmente, segunda vizinhanças.

O método também pode ser utilizado



com vantagens no cálculo de curto-circuito monofásico, quando não aparece o efeito de indutâncias mútuas.

Em situações em que é necessária a determinação de contribuição de ordens superiores (tanto para curto-circuito trifásico como monofásico), ou então em que deve ser levado em conta o efeito das indutâncias mútuas (curto-circuito monofásico), a melhor alternativa é utilizar o método da matriz  $Y_{\text{BARRA}}$ -fatorada mencionada no item precedente.

#### 2.3.3. Acoplamentos mútuos

Num sistema de potência são comuns casos em que a energia elétrica é transmitida por linhas de transmissão trifásicas em circuitos duplos, ou ainda, por vários circuitos paralelos. Há casos ainda, de circuitos de níveis de tensões diferentes perfilarem paralelamente ao longo de suas extensões. Nas situações acima, a presença de fluxos de correntes desequilibradas que decorrem de uma falha à terra causam induções mútuas.

As induções mútuas resultantes dos fluxos de correntes de sequência positiva ou negativa são pequenas e são reduzidas a valores desprezíveis mediante transposições dos condutores das fases. As transposições, porém, não têm influência sobre a indução no circuito de sequência zero [6].

O valor da impedância mútua é cerca de 50 a 70% da impedância própria [41] e a sua não inclusão na rede de sequência zero pode acarretar erros consideráveis nas magnitudes das correntes de curto-cir

cuitos à terra, contribuições e tensões de sequência zero.

A inclusão do efeito das indutâncias mútuas nos métodos analógicos era feita por técnicas específicas. Em analisadores de circuito c.a. as impedâncias mútuas podiam ser incluídas representando-se por circuitos equivalentes, ou ainda, em casos de linhas sem barras em comum, por transformadores especiais de relação 1:1 [6].

Em analisadores de circuito c.c. os acoplamentos mútuos entre linhas sem barras em comum (onde a representação por circuito equivalente é extremamente trabalhosa) a sua inclusão só era possível usando-se um dispositivo especial em conjunção com o analisador, conforme a Ref. [16].

Nos métodos digitais, tanto nas formulações por malhas como nas formulações nodais a inclusão de mútuas foi tratada, conforme as Refs. [12, 14 e 15].

No método da matriz de impedância  $Z_{BARRA}$ , vários métodos de incorporar acoplamentos mútuos foram desenvolvidos. Basicamente podem-se agrupar estes métodos em três categorias:

1. A formação da matriz segue o processo de inclusão linha por linha, porém com uma diferença essencial, isto é, o algoritmo de formação é modificado para linhas mutuamente acoplados a fim de seu efeito ser incorporado no momento que a linha é adicionada à rede [20, 26 e 38].
2. Os parâmetros originais das linhas e as mútuas são modificados para incorporar o efeito dos acoplamentos antes de os dados serem processados na formação da matriz. Portanto, a matriz é formada passo a passo com os dados das linhas acopladas alterados. Em seguida, a matriz é modificada para

cada acoplamento, mediante cálculos em duas etapas |30|.

3. A matriz é formada ignorando-se as mútuas. Posteriormente o efeito de todos os acoplamentos mútuos é compensado de uma única vez |33|.

Nos métodos  $Y_{\text{BARRA}}$ -fatorada e  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa a inclusão das mútuas é feita na matriz de admitância nodal  $Y_{\text{BARRA}}$ , durante |36| ou após a sua formação |27|.

#### 2.3.4. Tipos de simulações e grandezas calculadas

A análise de curto-circuito deve ser feita não só no caso básico, mas também para outras configurações que envolvem remoção ou inclusão de linhas na rede. A solução do problema de curto-circuito para estas outras configurações é obtida através de métodos que aproveitam as informações já contidas na solução do caso básico, pois as redes só diferem pela inclusão ou remoção de uma linha.

A inclusão ou remoção de linhas na rede se torna mais complexa se a linha envolvida tiver acoplamentos mútuos (rede de sequência zero), sendo que os algoritmos tomam aspectos bem diferentes.

É claro que qualquer mudança na topologia da rede tem como consequência, em geral, a modificação de todos os elementos da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ .

Os programas de curto-circuito, na maioria dos casos, simulam falhas trifásicas e monofásicas, nas quais além do caso básico são calculadas as condições de linha aberta (line-out) e falha em fim de linha (line end-fault), em todas as linhas ligadas à barra onde se simula o curto-circuito.

As grandezas calculadas (módulos ou módulos e ângulos) nos três casos são:

- potência (MVA) de curto-circuito total;
- contribuições (em MVA) das barras remotas;
- tensões (em p.u.) nas barras remotas;
- tensões (em p.u.) de seqüências positiva e zero nas barras em estudo.

### CAPÍTULO III

#### ASPECTOS TEÓRICOS CONSIDERADOS NA ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO

##### 3.1. Modelagem da rede para análise de curto-circuito

As correntes em um sistema de potência em condições de curto-circuito são muito maiores que as correntes que fluem em condições de operação normal. Este fato permite que se façam duas simplificações muito importantes nos modelos utilizados na análise de curto-circuito:

- a - o sistema (pré-falha) é considerado operando em vazio, isto é, são desligados todos os elementos "shunt" (cargas, capacitância das linhas, capacitores e reatores "shunt", etc).
- b - consideram-se todas as máquinas operando em  $1.0 \text{ pu } \angle 0^\circ$ .

As duas simplificações equivalem a dizer que, em condições de operação normal (sem curto), todas as correntes do sistema são nulas.

Considere-se o sistema de 5-barras representado na Fig. - 3.1.

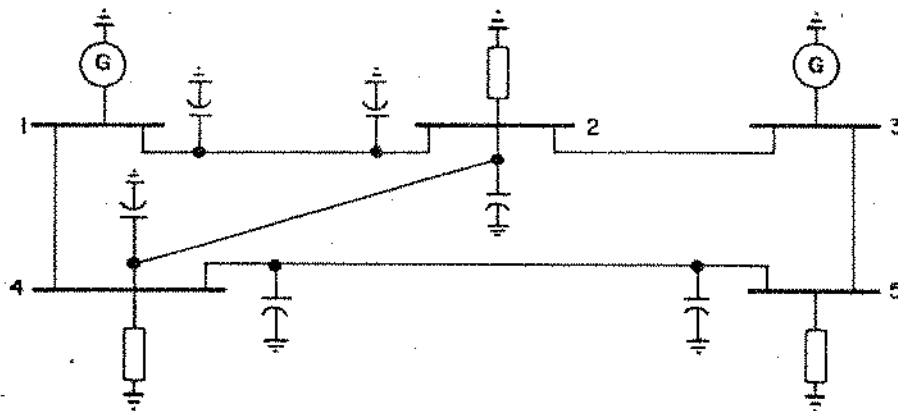


Fig. 3.1 Diagrama unifilar de um sistema de potência.

Levando-se em conta a simplificação (a), este sistema passa a ter a representação dada na Fig. - 3.2.

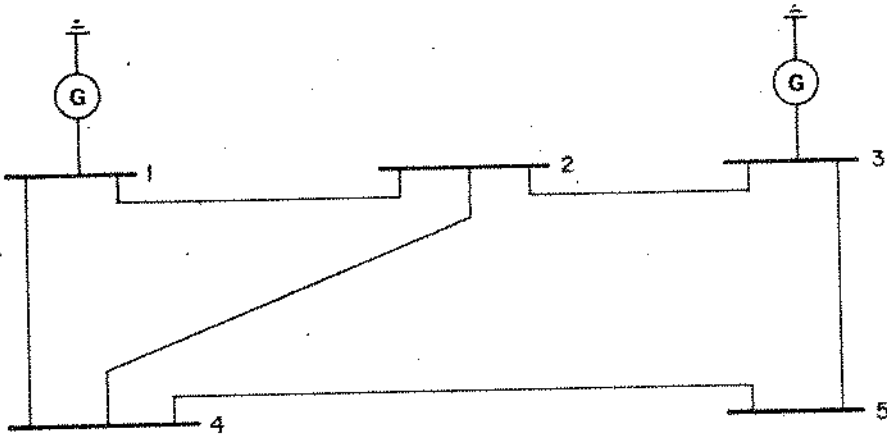


Fig. 3.2 Diagrama unifilar com simplificação (a).

Considerando-se em seguida a simplificação (b), o sistema pode ser colocado na forma dada na Fig. - 3.3.

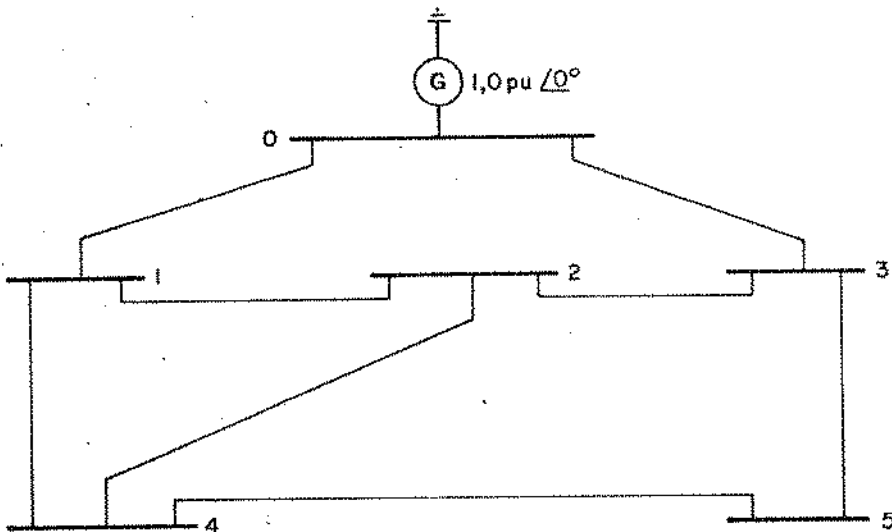


Fig. 3.3 Diagrama unifilar com simplificações (a) e (b).

No estudo de curto-circuito, dado o grande número de alternativas que devem ser analisadas, é importante que a matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  do sistema seja a mesma, independentemente da barra onde se simula o curto-circuito. Isto ocorrerá se a barra de referência for escolhida convenientemente. É claro que se a configuração da rede mudar a matriz será alterada.

Seja por exemplo, um curto-circuito na barra 5 do sistema da Fig. - 3.3. Esta situação está representada nas Fig. - 3.4(a) e (b).

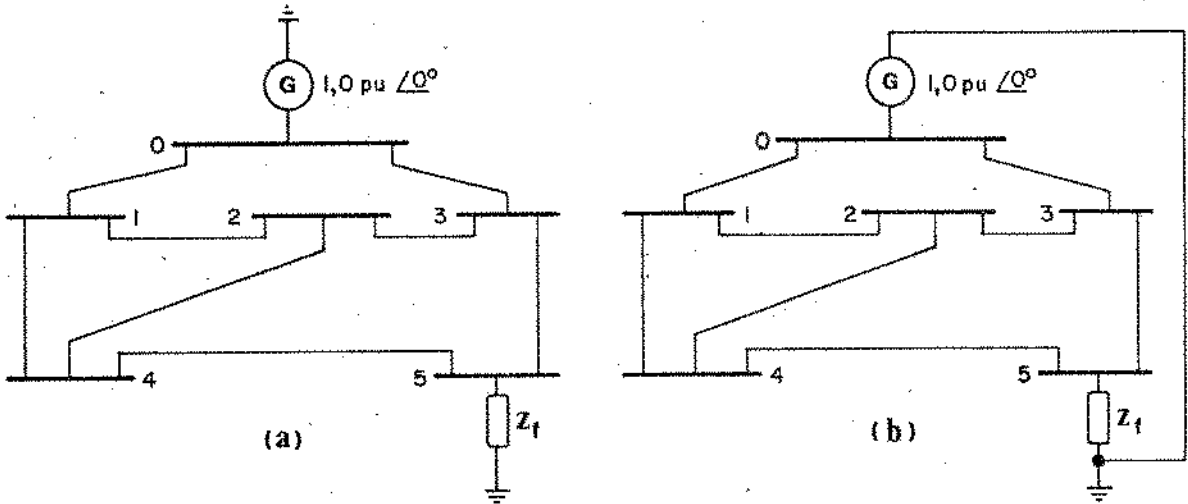


Fig. 3.4 Curto-circuito na barra 5.

Se for considerado um curto-circuito sólido, isto é,  $z_f = 0$ , então a configuração do sistema passa a ser da Fig. - 3.5.

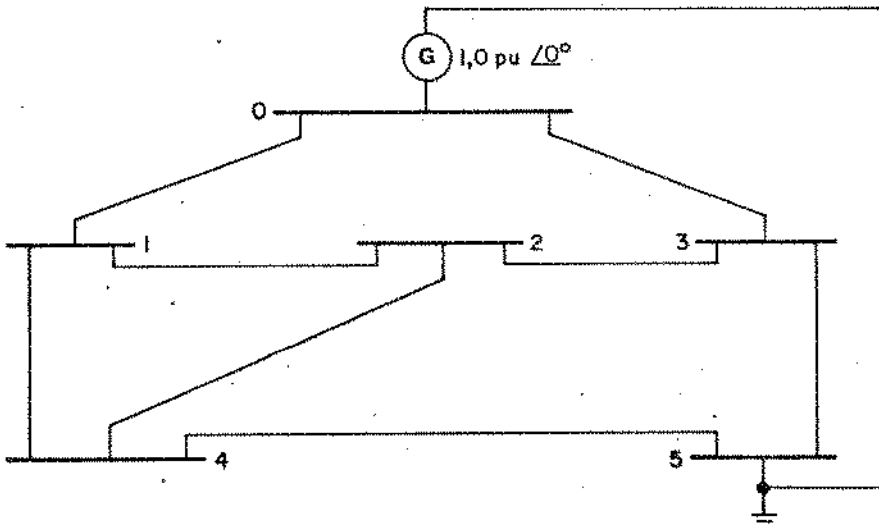


Fig. 3.5 Curto-circuito sólido na barra 5.





Uma vez resolvido o problema da Fig. - 3.6, as tensões do problema real podem ser determinadas a partir da equação (3.1).

Utilizando-se uma representação do tipo apresentada na Fig. - 3.6, a única barra com corrente nodal não nula é a barra curto-circuitada. Portanto, a equação matricial que relaciona a corrente de curto-circuito e as tensões nas barras através da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  é dada por:

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1k} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2k} & \dots & z_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ z_{k1} & z_{k2} & \dots & z_{kk} & \dots & z_{kn} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nk} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ I_k \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdot \\ E_k \\ \cdot \\ E_n \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde

$Z_{\text{BARRA}}$  - matriz de impedância nodal;

$\underline{I}$  - vetor corrente nodal;

$\underline{E}$  - vetor tensão nodal.

O tratamento dado às redes de sequência positiva e zero é o mesmo, com a diferença que no caso da sequência zero não aparece a fonte de tensão.

### 3.2. Curto-circuito trifásico

Seja um curto-circuito trifásico sólido em uma barra k do sistema ilustrado na Fig. - 3.7.

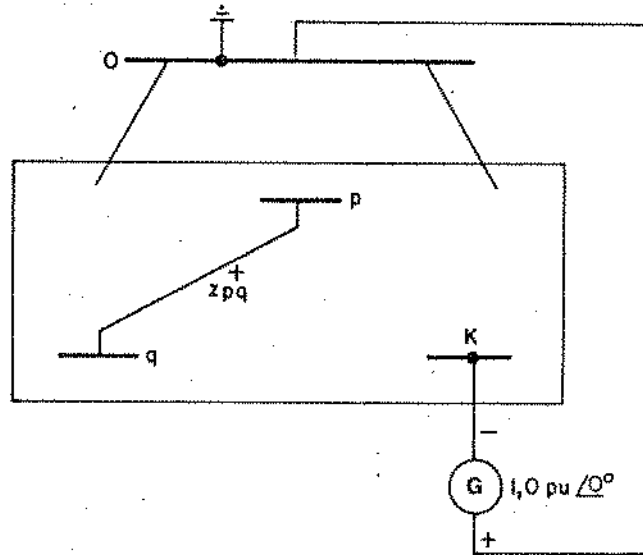


Fig. 3.7 Curto-circuito trifásico.

A corrente de curto-circuito na barra k é obtida a partir da k-ésima equação do sistema (3.2), ou seja:

$$I_k = \frac{E_k}{Z_{kk}} = \frac{-1.0}{Z_{kk}} \quad (3.3)$$

As tensões nas barras são obtidas substituindo-se (3.3) em (3.2):

$$E_i = - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk}} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

O perfil real de tensões é

$$E_i^R = 1.0 - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk}} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

O fluxo de corrente (contribuição) em uma ligação p-q é dado por

$$I_{pq} = \frac{E_p - E_q}{z_{pq}^+} \quad (3.6)$$

sendo  $z_{pq}^+$  a impedância de sequência positiva da ligação p-q.

Considerando-se que:

$$E_p = - \frac{Z_{pk}}{Z_{kk}}$$

$$E_q = - \frac{Z_{qk}}{Z_{kk}}$$

então a contribuição  $I_{pq}$  pode ser escrita na forma:

$$I_{pq} = \frac{1}{z_{pq}^+} \cdot \frac{Z_{qk} - Z_{pk}}{Z_{kk}} \quad (3.7)$$

### 3.3. Curto-circuito à terra

#### 3.3.1. Método das componentes simétricas

"Um sistema polifásico desequilibrado de n fatores relacionados, pode ser decomposto em n siste-

mas de fasores equilibrados, chamados de componentes simétricas dos fasores originais, e esta decomposição é única". Este teorema fundamental, foi demonstrado em 1918 por C.L. Fortescue [2]. Apesar de estar formulado para sistemas com  $n$  fases, as aplicações em sistemas de potência se limitam a sistemas trifásicos.

Num sistema trifásico equilibrado, as tensões e correntes se caracterizam por uma completa simetria, isto é, fasores de módulos iguais, defasados de  $120^\circ$  e  $240^\circ$ . Estas condições são obedecidas pelo fato de que as matrizes impedâncias dos elementos da rede (geradores, transformadores, linhas de transmissão transpostas) são diagonais, com todos os elementos da matriz iguais. Isto representa o desacoplamento entre as fases. Portanto, toda a análise de um sistema trifásico equilibrado pode ser feito como para um sistema monofásico [32].

Num sistema trifásico equilibrado as grandezas de duas fases podem ser expressas em função da outra fase, chamada de fase principal, pela introdução de conceito de operador de fase, simbolizado pela letra  $a$ . Operador  $a$  é um fasor unitário com defasagem de  $120^\circ$  em relação ao eixo real positivo. (Fig. - 3.8)

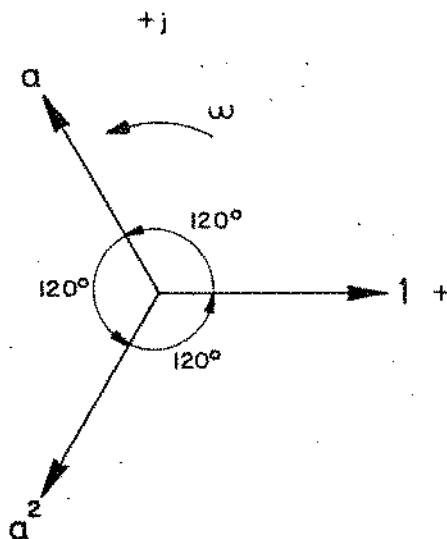


Fig. 3.8  
Sistema simétrico de fasores unitários.

Portanto,

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1$$

Multiplicar um fasor pelo operador  $a$  implica em imprimir uma rotação de  $120^\circ$  na direção positiva. Se o multiplicador for  $a^2$  a rotação será de  $240^\circ$ .

Em um sistema trifásico desequilibrado (curto-circuito e cargas assimétricas) as matrizes impedância dos elementos componentes do sistema são todos não-diagonais, significando que há acoplamentos entre as fases. Portanto, um tratamento monofásico neste caso é impossível.

De acordo com o teorema de Fortescue, um sistema trifásico desequilibrado pode ser resolvido decompondo-o em três sistemas equilibrados, cujas componentes são designadas:

1. componentes de sequência positiva, constituídas de três fasores de módulos iguais defasados de  $120^\circ$  e  $240^\circ$  e tendo a mesma sequência de fases do sistema original;
2. componentes de sequência negativa, constituídas de três fasores de módulos iguais defasados de  $120^\circ$  e  $240^\circ$  e tendo a sequência de fases oposta do sistema original;
3. componentes de sequência zero, constituídas de três fasores de módulos iguais, em fase.

Como as três componentes são sistemas equilibrados, cada uma pode ser tratada individualmente, como se fossem circuitos monofásicos.

Será considerada a seguir a transformação de um sistema desequilibrado em três sistemas equilibrados. Sejam os fasores A, B e C do sistema original, podendo representar ou correntes ou tensões.

A idéia de Fortescue consiste em se escrever sistema de equações:

$$\left. \begin{aligned} A &= A_+ + A_- + A_o \\ B &= B_+ + B_- + B_o \\ C &= C_+ + C_- + C_o \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

onde os índices + , - e o indicam, respectivamente seqüências positiva, negativa e zero.

Aplicando-se o operador a nas componentes de seqüência positiva e negativa, tomando-se como fase principal a fase A tem-se:

$$\left. \begin{aligned} B_+ &= a^2 A_+ \\ C_+ &= a A_+ \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

$$\left. \begin{aligned} B_- &= a A_- \\ C_- &= a^2 A_- \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Para a seqüência zero tem-se:

$$B_O = C_O = A_O \quad (3.11)$$

Substituindo-se as expressões (3.9), (3.10) e (3.11) em (3.8) obtem-se:

$$\left. \begin{aligned} A &= A_+ + A_- + A_O \\ B &= a^2 A_+ + a A_- + A_O \\ C &= a A_+ + a^2 A_- + A_O \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_+ \\ A_- \\ A_O \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

ou

$$\underline{P} = T \cdot \underline{S} \quad (3.14)$$

Portanto,

$$\underline{S} = T^{-1} \cdot \underline{P} \quad (3.15)$$

Sendo,

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

As deduções apresentadas de (3.8) a (3.16)

constituem a própria demonstração do teorema de Fortescue no caso de sistemas trifásicos.

### 3.3.2. Acoplamentos mútuos em linhas de transmissão

Considerem-se duas bobinas magneticamente acopladas [28], conforme representa a Fig. - 3.9

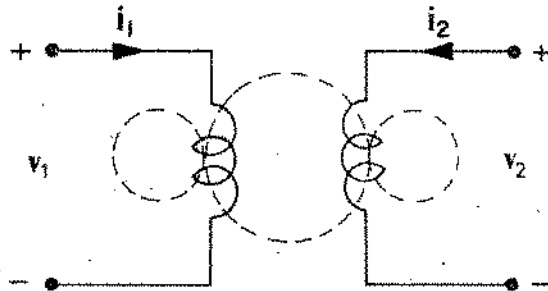


Fig. 3.9 Duas bobinas magneticamente acopladas.

Se o núcleo das duas bobinas for de um material magnético, para correntes suficientemente grandes, as relações entre os fluxos  $\phi_1$  e  $\phi_2$  e as correntes  $i_1$  e  $i_2$  não serão lineares. Neste caso tem-se:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= f_1(i_1, i_2) \\ \phi_2 &= f_2(i_1, i_2) \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

onde  $f_1$  e  $f_2$  são funções não lineares de  $i_1$  e  $i_2$ .

As tensões  $v_1$  e  $v_2$  se relacionam com as correntes  $i_1$  e  $i_2$  pelas expressões:



$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{\partial f_1}{\partial i_1} \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{\partial f_1}{\partial i_2} \cdot \frac{di_2}{dt} \\ v_2 &= \frac{d\phi_2}{dt} = \frac{\partial f_2}{\partial i_1} \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{\partial f_2}{\partial i_2} \cdot \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Particularmente, quando o núcleo for constituído por um material não magnético, os fluxos serão funções lineares das correntes. Desta forma, tem-se:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= L_1 i_1 + M i_2 \\ \phi_2 &= M i_1 + L_2 i_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

onde os coeficientes  $L_1$  e  $L_2$  são chamados de auto-indutâncias e  $M$  de indutância mútua. Tais coeficientes não dependem nem do tempo e nem das correntes  $i_1$  e  $i_2$ .

Derivando as expressões (3.19) tem-se as tensões:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{d\phi_1}{dt} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \\ v_2 &= \frac{d\phi_2}{dt} = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Em regime permanente senoidal as tensões e as correntes podem ser representadas pelos fasores correspondentes:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= j\omega L_1 \cdot I_1 + j\omega M \cdot I_2 \\ v_2 &= j\omega M \cdot I_1 + j\omega L_2 \cdot I_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Adotando-se a convenção do receptor [42] (Fig. - 3.10) em cada circuito, para tensões e correntes, os parâmetros  $L_1$  e  $L_2$  são positivos.

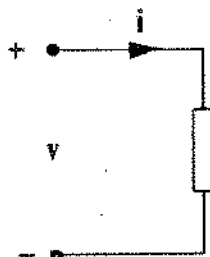


Fig. 3.10 Convenção de receptor.

O mesmo não se pode afirmar com relação ao sinal da indutância mútua  $M$ , que pode ser positivo ou negativo, dependendo dos sentidos dos fluxos  $\phi_1$  e  $\phi_2$  no núcleo, produzidos respectivamente pelas correntes  $i_1$  e  $i_2$ , admitidas ambas positivas. As Figs. - 3.11.a e 3.11.b ilustram o sinal de  $M$ .

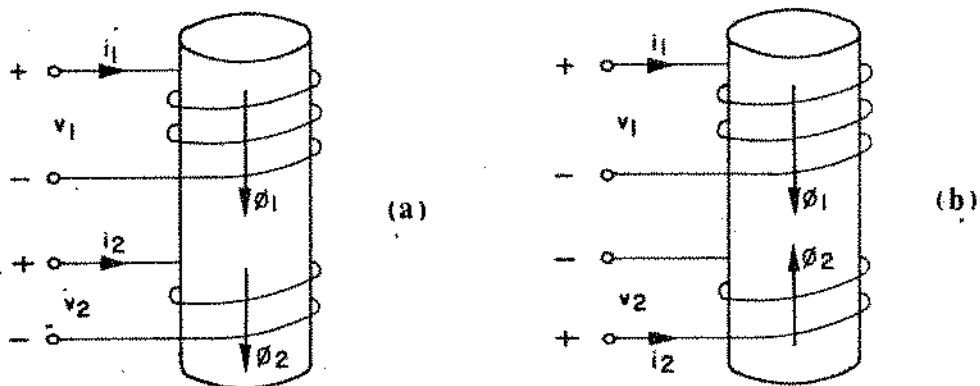


Fig. 3.11 Sinal de indução mútua.

No primeiro caso  $\phi_2$  reforça  $\phi_1$ , portanto,  $M$  deve ser positivo, e no segundo  $\phi_2$  enfraquece  $\phi_1$ , então  $M$  deve ser negativo.

A identificação do sentido dos fluxos e consequente sinal da indutância mútua desenhando os enrolamentos em perspectiva é uma maneira pouco prática. Portanto, adota-se a convenção das marcas, pontos por exemplo, para representar o sinal das indutâncias mútuas. As Figs. - 3.12a e 3.12b representam respectivamente as Figs. - 3.11a e 3.11b.

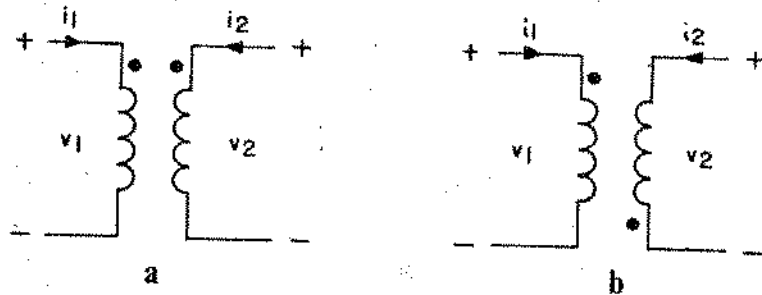


Fig. 3.12 Convenção para o sentido dos fluxos.

Na prática estes pontos são conhecidos como marca das polaridades, onde o primeiro é dito polaridade subtrativa e o segundo polaridade aditiva.

No caso representado pela Fig. - 3.9, se as bobinas em ambos os circuitos forem constituídas de uma única espira e o núcleo for de ar tem-se o modelo de circuito de sequência zero para linhas de transmissão com acoplamentos mútuos (Fig. - 3.13).

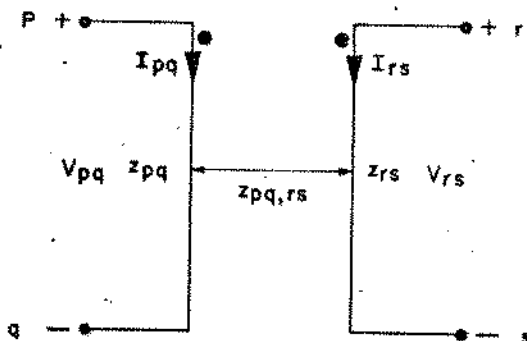


Fig. 3.13  
Indução mútua entre  
linhas de transmissão  
paralelas.

Portanto, são válidas as expressões (3.21), podendo ser reescritas na forma:

$$\left. \begin{aligned} V_{pq} &= z_{pq} \cdot I_{pq} + z_{pq,rs} \cdot I_{rs} \\ V_{rs} &= z_{rs,pq} \cdot I_{pq} + z_{rs} \cdot I_{rs} \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

Na forma matricial

$$\begin{bmatrix} V_{pq} \\ V_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{pq} & z_{pq,rs} \\ z_{rs,pq} & z_{rs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{rs} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

No caso geral, para um grupo de  $n$  linhas mutuamente acopladas têm-se:

$$\underline{V} = \underline{Z}_{pri} \underline{I} \quad (3.24)$$

sendo;

$\underline{V}$  - vetor das quedas de tensões nos elementos da rede.

$\underline{Z}_{pri}$  - matriz de impedância dos elementos da rede (matriz primitiva).

$\underline{I}$  - vetor das correntes nos elementos da rede.

Da expressão (3.24) obtêm-se:

$$\underline{I} = Y_{\text{pri}} \cdot \underline{V} \quad (3.25)$$

onde  $Y_{\text{pri}} = Z_{\text{pri}}^{-1}$

No caso particular de duas linhas mutuamente acopladas tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pq} & Y_{pq,rs} \\ Y_{rs,pq} & Y_{rs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{pq} \\ V_{rs} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

A matriz de admitância primitiva é utilizada para duas finalidades:

1. inclusão do efeito dos acoplamentos mútuos na matriz admitância nodal;
2. cálculo dos fluxos de corrente de seqüência zero em linhas com acoplamentos mútuos.

Portanto, após a sua formação a matriz  $Y_{\text{pri}}$  deve ser armazenada.

Quando da ocorrência de curto-circuito à terra [6], as correntes de seqüência zero fluindo através das três fases, no mesmo sentido (retornando via solo, ou solo e cabos para-raios), induzem tensões nos circuitos acoplados, podendo causar a circulação de correntes induzidas que fluem na direção oposta. Portanto, a impedância mútua de seqüência zero entre os circuitos, tende a reduzir a corrente de curto-circuito sob certas condições, ou aumentá-la sob outras condições, dependendo das direções relativas da corrente de seqüência zero e a corrente induzida.

### 3.3.3. Curto-circuito monofásico

Quando ocorre um curto-circuito monofásico o sistema fica desequilibrado e o problema é resolvido pelo método das componentes simétricas.

A análise de curto-circuito monofásico requer as redes das três seqüências: positiva, negativa e zero, as quais são colocadas em série, como mostra a Fig. - 3.14. (maiores detalhes no Apêndice A ). A rede de seqüência negativa é considerada idêntica à rede de seqüência positiva (exceto a fonte, que não existe na rede de seqüência negativa). Esta consideração pode introduzir pequenos erros nas grandezas calculadas próximas as barras de geração, porém traz grandes vantagens, no que se refere a tempo e memória do computador, visto que se elimina uma matriz.

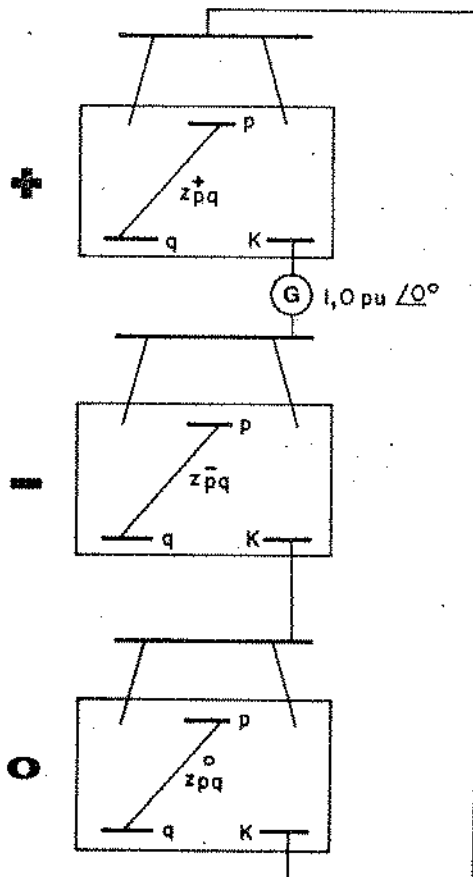


Fig. 3.14

Conexões das redes de seqüências para simulação de curto-circuito monofásico.

Seja um curto-circuito monofásico sólido na barra  $k$ , cujo diagrama é dado na Fig. - 3.14.

As correntes de sequência no ponto em curto são dadas por:

$$I_+ = I_- = I_0 = \frac{-1.0}{2 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^0} \quad (3.27)$$

A corrente de curto-circuito monofásico na barra  $k$  é:

$$I_k = I_+ + I_- + I_0 = 3 I_0 \quad (3.28)$$

As tensões de sequência positiva nas barras são obtidas substituindo-se (3.27) em (3.2):

$$E_{+i} = \frac{-Z_{ik}^+}{2 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^0} \quad \text{para } i=1,2,\dots,n \quad (3.29)$$

O perfil real de tensões será:

$$E_{+i}^R = 1.0 - \frac{Z_{ik}^+}{2 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^0} \quad \text{para } i=1,2,\dots,n \quad (3.30)$$

As tensões de sequência zero nas barras são obtidas substituindo-se (3.27) em (3.2):

$$E_{0i} = \frac{-Z_{ik}^0}{2 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^0} \quad \text{para } i=1,2,\dots,n \quad (3.31)$$

O circuito de sequência zero não possui fonte, portanto, o perfil real de tensão será:

$$E_{oi}^R = - \frac{z_{ik}^0}{2 z_{kk}^+ + z_{kk}^0} \quad \text{para } i=1,2,\dots,n \quad (3.32)$$

O fluxo de corrente de sequência positiva em uma determinada ligação p - q é dada por:

$$I_{pq}^+ = \frac{E_{+p} - E_{+q}}{z_{pq}^+} \quad (3.33)$$

sendo:

$$E_{+p} = \frac{- z_{pk}^+}{2 z_{kk}^+ + z_{kk}^0}$$

$$E_{+q} = \frac{- z_{qk}^+}{2 z_{kk}^+ + z_{kk}^0}$$

tem-se

$$I_{pq}^+ = \frac{1.0}{z_{pq}^+} \cdot \frac{z_{qk}^+ - z_{pk}^+}{2 z_{kk}^+ + z_{kk}^0} \quad (3.34)$$

Para o cálculo dos fluxos de correntes de sequência zero distinguem-se dois casos:



1. Fluxos em linhas sem acoplamentos mútuos.

Seguindo-se o mesmo raciocínio desenvolvido para o cálculo de fluxo de sequência positiva tem-se:

$$I_{pq}^0 = \frac{1.0}{z_{pq}^0} \cdot \frac{z_{qk}^0 - z_{pk}^0}{2 z_{kk}^+ + z_{kk}^0} \quad (3.35)$$

2. Fluxos em linhas com acoplamentos mútuos.

Em linhas que fazem parte de um grupo de linhas mutuamente acopladas, o fluxo de corrente de sequência zero é calculado usando-se a linha da equação matricial (3.25) correspondente à linha em que se quer o fluxo.

O fluxo na linha p - q, para um curto na barra k, no caso em que existem sô duas linhas mutuamente acopladas é obtido a partir de (3.26):

$$I_{pq}^0 = \begin{bmatrix} y_{pq} & y_{pq,rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pq}^0 \\ v_{rs}^0 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

No caso geral, isto é, com n linhas mutuamente acopladas, tem-se:

$$I_{pq}^0 = Y_{\ell} \cdot \underline{V} \quad (3.37)$$

sendo:

$\underline{Y}_l$  - vetor formado pela linha da matriz  $Y_{pri}$ , correspondente à linha de transmissão onde se quer calcular o fluxo.

$\underline{V}$  - vetor das tensões nas linhas, que pode ser escrito em função das tensões nodais.

No caso de duas linhas mutuamente acopladas, tem-se:

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} E_{op}^R - E_{oq}^R \\ E_{or}^R - E_{os}^R \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

As tensões nodais podem ser explicitadas em função dos elementos de  $Z_{BARRA}^o$ , conforme (3.32).

$$\underline{V} = \frac{1.0}{2 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^o} \begin{bmatrix} Z_{qk}^o - Z_{pk}^o \\ Z_{sk}^o - Z_{rk}^o \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Portanto,

$$I_{pq}^o = \frac{1.0}{2 Z_{kk}^+ + Z_{kk}^o} \begin{bmatrix} y_{pq}, & y_{pq,rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{qk}^o - Z_{pk}^o \\ Z_{sk}^o - Z_{rk}^o \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

ou

$$I_{pq}^0 = I_{ok} Y_l Z_d^0 \quad (3.41)$$

onde

$I_{ok}$  - corrente de curto-circuito monofásico na barra k;

$Y_l$  - vetor formado pela linha da matriz  $Y_{pri}$ , correspondente à linha de transmissão onde se quer calcular o fluxo;

$Z_d^0$  - vetor formado pela diferença dos elementos da matriz  $Z_{BARRA}^0$ .

O fluxo total na linha p - q será:

$$I_{pq} = 2 I_{pq}^+ + I_{pq}^0 \quad (3.42)$$

### 3.4. Métodos das matrizes esparsas

Os métodos da matriz  $Y_{BARRA}$ -fatorada e da matriz  $Z_{BARRA}$ -esparsa tiram vantagens da esparsidade da matriz de admitância nodal  $Y_{BARRA}$ . Em ambos os métodos utiliza-se a técnica de fatoração triangular de uma matriz por eliminação de Gauss, adaptada às matrizes esparsas.

A matriz  $Y_{BARRA}$  pode ser colocada na forma de um produto de matrizes esparsas, como mostra a equação

$$Y_{BARRA} = L D U \quad (3.43)$$

e como  $Y_{\text{BARRA}}$  é simétrica,

$$U = L^t$$

Portanto,

$$Y_{\text{BARRA}} = L D L^t \quad (3.44)$$

Os elementos das matrizes  $L$ ,  $D$  e  $U$  aparecem durante o processo de eliminação de Gauss.

As maneiras de se realizar o processo de eliminação podem ser: operando linha por linha [23], ou combinando eliminação inferior por coluna e superior por linha, método este conhecido como bi-fatoração [34].

Nas matrizes da forma fatorada, aparecem elementos (fill-in), cujas posições na matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  eram vagas, causando com isso a redução da esparsidade dessas matrizes. Como a eficiência computacional depende da esparsidade das matrizes dos fatores é importante minimizar o aparecimento desses elementos. A redução do número de novos elementos pode ser conseguida através de um processo de renumeração dos nós da rede, que corresponde a uma reordenação do pivoteamento. Este processo é conhecido como ordenação ótima.

Existem várias maneiras de realizar a ordenação, tais como: ordenação tipo banda, ordenação segundo o grau mínimo e a ordenação segundo o grau mínimo dinâmico.

Os elementos da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa são obtidos manipulando-se os elementos dos fatores esparsos  $L D U$ .

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados ambos os métodos ( $Y_{\text{BARRA}}$ -fatorada e  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa), dependendo do tipo de aplicação, como já foi comentado no Cap. - II.

Mais detalhes sobre os métodos das matrizes esparsas são apresentados no Apêndice B.

### 3.5. Tratamento das indutâncias mútuas na rede de seqüência zero pelo método da compensação

Neste item será desenvolvido o circuito equivalente que é utilizado para representar um grupo de linhas com acoplamento mútuo. Este circuito equivalente é utilizado na formação da matriz admitância nodal do sistema, e é obtido aplicando-se o método da compensação.

Considere-se um sistema conforme a representação da Fig. - 3.15 ao qual se vai acrescentar um grupo de linhas com in dutância mútua.



Fig. 3.15 Estado inicial.

Quando essas novas linhas são acrescentadas, o estado do sistema se altera. Pode-se, no entanto, evitar que o conjunto de linhas adicionadas afete o estado inicial do sistema, desde que sejam injetadas nas barras terminais desse conjunto de linhas as correntes que fluiriam por elas. Esta situação está representada na Fig. - 3.16.

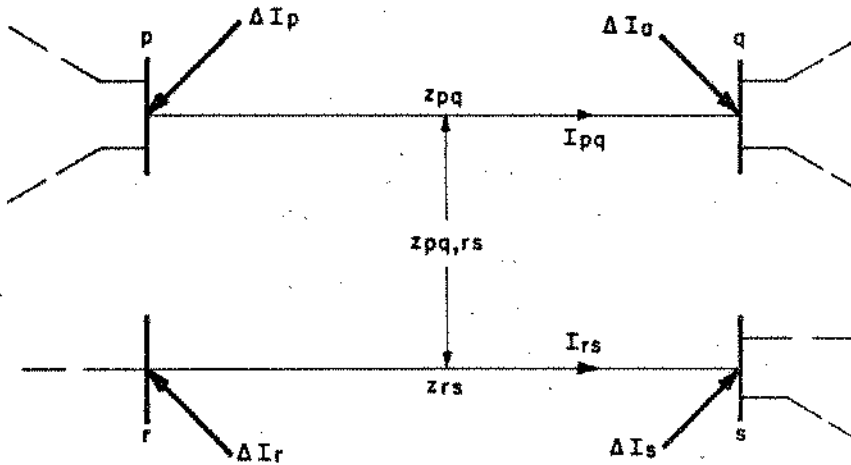


Fig. 3.16 Estado final simulado.

A equação matricial mostrando apenas os elementos correspondentes às barras terminais do conjunto de linhas adicionado, antes que sejam efetuadas as ligações é:

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ I_p \\ I_q \\ I_r \\ I_s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ E_p \\ E_q \\ E_r \\ E_s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

ou

$$\underline{I} = Y \underline{E} \quad (3.46)$$

Após a adição de grupo de linhas com acoplamento mútuo e das novas injeções, o vetor das correntes nodais passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ I'_p \\ I'_q \\ I'_r \\ I'_s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ I_p + \Delta I_p \\ I_q + \Delta I_q \\ I_r + \Delta I_r \\ I_s + \Delta I_s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

sendo

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_p &= I_{pq} \\ \Delta I_q &= -I_{pq} \\ \Delta I_r &= I_{rs} \\ \Delta I_s &= -I_{rs} \end{aligned} \right\} \quad (3.48)$$

Portanto,

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ I'_p \\ I'_q \\ I'_r \\ I'_s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ I_p + I_{pq} \\ I_q - I_{pq} \\ I_r + I_{rs} \\ I_s - I_{rs} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

A matriz de admitância primitiva do grupo de linhas com indutância mútua é:

$$\begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pq} & Y_{pq,rs} \\ Y_{pq,rs} & Y_{rs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{pq} \\ V_{rs} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

sendo

$$\begin{bmatrix} V_{pq} \\ V_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_p - E_q \\ E_r - E_s \end{bmatrix} \quad (3.51)$$



Portanto,

$$\left. \begin{aligned} I_{pq} &= y_{pq} E_p - y_{pq} E_q + y_{pq,rs} E_r - y_{pq,rs} E_s \\ I_{rs} &= y_{pq,rs} E_p - y_{pq,rs} E_q + y_{rs} E_r - y_{rs} E_s \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

Substituindo (3.52) em (3.49) tem-se:

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ I'_p \\ I'_q \\ I'_r \\ I'_s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ I_p \\ I_q \\ I_r \\ I_s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ y_{pq} & -y_{pq} & y_{pq,rs} & -y_{pq,rs} \\ -y_{pq} & y_{pq} & -y_{pq,rs} & y_{pq,rs} \\ y_{pq,rs} & -y_{pq,rs} & y_{rs} & -y_{rs} \\ -y_{pq,rs} & y_{pq,rs} & -y_{rs} & y_{rs} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ E_p \\ E_q \\ E_r \\ E_s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

ou

$$\underline{I}' = \underline{I} + \Delta Y E \quad (3.54)$$

Substituindo o vetor  $\underline{I}$  da equação (3.46) na equação (3.54) vem:

$$\underline{I}' = Y \underline{E} + \Delta Y \underline{E} \quad (3.55a)$$

$$\underline{I}' = (Y + \Delta Y) \underline{E} \quad (3.55b)$$

$$\underline{I}' = Y' \underline{E} \quad (3.55c)$$

Portanto,

$$Y' = \begin{bmatrix} & p & q & r & s \\ & . & . & . & . \\ & . & . & . & . \\ p & . & . & . & Y_{pp} + Y_{pq} & -Y_{pq} & Y_{pq,rs} & -Y_{pq,rs} & . & . \\ q & . & . & . & -Y_{pq} & Y_{qq} + Y_{pq} & -Y_{pq,rs} & Y_{pq,rs} & . & . \\ r & . & . & . & Y_{pq,rs} & -Y_{pq,rs} & Y_{rr} + Y_{rs} & -Y_{rs} & . & . \\ s & . & . & . & -Y_{pq,rs} & Y_{pq,rs} & -Y_{rs} & Y_{ss} + Y_{rs} & . & . \\ & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ & . & . & . & . & . & . & . & . & . \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

O circuito equivalente correspondente à matriz (3.56) é dada pela Fig. - 3.17.

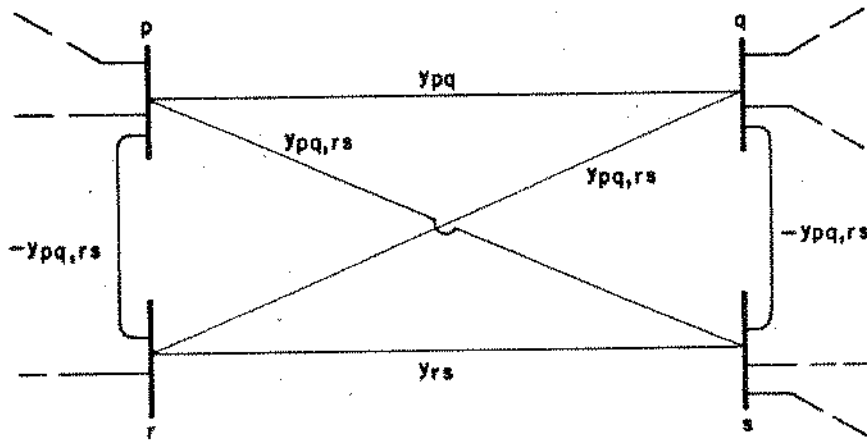


Fig. 3.17 Circuito equivalente.

Esta dedução foi ilustrada para um conjunto de duas linhas com indutância mútua, mas pode ser generalizada para grupos maiores.

Após obter o circuito equivalente, todos os seus ramos têm o mesmo tratamento dado aos elementos sem acoplamentos.

Este mesmo assunto, no Apêndice C, será abordado de uma outra maneira.

### 3.6. Simulações de abertura de uma linha e curto-circuito em fim de linha

Para o estudo das proteções, além do caso básico, dois outros casos devem ser simulados em todas as linhas ligadas diretamente à barra em que se analisa o curto-circuito, quais sejam:

1. abertura de linha ("open-line")
2. falta em fim de linha ("open end-fault")

As contingências acima citadas, por alterarem a configuração da rede afetam todos os elementos da matriz de impedância nodal.

No método da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  pode-se recalcular apenas os elementos relevantes da matriz, isto é, somente a impedância no ponto e as impedâncias de transferência da coluna da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  referente à barra na qual se analisa o curto-circuito, evitando-se deste modo cálculos desnecessários, que iriam modificar elementos que não são utilizados na análise.

Procedimento análogo é utilizado no método da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa, porém com uma diferença: como a matriz é armazenada compactamente, os elementos correspondentes à coluna que se quer recalcular são localizados mediante uma busca pelos apontadores.

No método  $Y_{\text{BARRA}}$ -fatorada a alteração é feita nos elementos da coluna da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  previamente obtida pelo procedimento descrito em 2.3.2.3.b (Cap. - II).

Nos algoritmos que se seguem, estão indicadas as modificações apenas dos elementos da coluna da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  referente à barra em que simula o curto-circuito.

### 3.6.1. Abertura de uma linha

Seja uma linha ligando a barra  $k$  à barra  $n$ , cuja impedância própria é  $z_{kn}$ .

Deseja-se analisar o curto-circuito na barra  $k$  com a referida linha aberta.

O algoritmo que recalcula os elementos da coluna da matriz referente à barra  $k$ , se a linha não tiver acoplamento mútuo [35 e 38], é:

$$z'_{kj} = z_{kj} - \frac{(z_{kk} - z_{kn})(z_{kj} - z_{nj})}{z_{kk} + z_{nn} - 2z_{kn} - z_{kn}} \quad (3.57)$$

sendo:

$j$  - barras vizinhas de  $k$ ;

$z_{kj}$  - impedâncias de transferência entre a barra  $k$  e as barras vizinhas, do caso básico;

$z_{kk}$  - impedância no ponto da barra  $k$ ;

$z_{kn}$  - impedância de transferência entre a barra  $k$  e a barra  $n$ ;

$z_{nj}$  - impedâncias de transferência entre a barra  $n$  e as barras vizinhas;

$z_{nn}$  - impedância no ponto da barra  $n$ ;

$z'_{kj}$  - impedâncias de transferência entre a barra  $k$  e as barras vizinhas, recalculadas para a condição linha aberta.

Para  $j = k$ , tem-se:

$$z'_{kk} = z_{kk} - \frac{(z_{kk} - z_{kn})^2}{z_{kk} + z_{nn} - 2z_{kn}} \quad (3.58)$$

sendo:

$z'_{kk}$  - impedância no ponto da barra  $k$ , recalculada para a condição linha aberta.

(Para maiores detalhes veja Apêndice - D).

Se a linha tiver acoplamento mútuo o algoritmo [31 e 37] será:

$$z'_{kj} = z_{kj} - \frac{C_k C_j}{P} \quad (3.59)$$

Para  $j = k$ ,

$$z'_{kk} = z_{kk} - \frac{(C_k)^2}{P} \quad (3.60)$$

onde

$$C_m = y_{\ell} z_{\alpha, m} \quad \text{para } m = k, j \quad (3.61)$$

e

$$P = y_{\ell} C_{\alpha} - y_{\ell\ell} \quad (3.62)$$

(Para maiores detalhes e definições dos fatores que aparecem em (3.59) a (3.62), veja Apêndice - D).

### 3.6.2. Curto-circuito em fim de linha

Em seguida ao estudo de abertura de uma linha, k-n por exemplo, é estudado o curto-circuito no fim dessa linha. Esta situação equivale a recolocar a linha, aberta em n e simular o curto-circuito no fim de linha. Se n' for terminal aberto, então a impedân

cia no ponto de  $n'$  e as impedâncias de transferência entre  $n'$  e as barras vizinhas de  $k$  são recalculadas respectivamente por:

$$z''_{n'n'} = z'_{kk} + z_{kn} \quad (3.63)$$

e

$$z''_{n'j} = z'_{kj} \quad (3.64)$$

Se a linha  $k-n$  tiver acoplamento mútuo o algoritmo |31 e 37| será:

$$z''_{n'n'} = z'_{nn} - \frac{(C_n + 1.0)^2}{P} \quad (3.65)$$

e

$$z''_{n'j} = z'_{nj} - \frac{C_j(C_n + 1.0)}{P} \quad (3.66)$$

sendo,

$z'_{nn}$  - impedância no ponto da barra  $n$ , recalculada para condição linha aberta;

$z'_{nj}$  - impedância de transferência entre a barra  $n$  e as barras vizinhas, recalculadas para condição linha aberta.

(Para maiores detalhes veja Apêndice - D).

### 3.6.3. Uma complicação adicional no estudo de condição linha aberta

No estudo de abertura de uma linha pertencente a um grupo de linhas mutuamente acoplado surge uma complicação adicional, que é o cálculo de fluxos de seqüência zero em outras linhas do grupo. Isto decorre do fato de que a abertura de uma linha provoca a alteração da matriz de acoplamento  $Z_{pri}$  e consequentemente uma nova matriz  $Y'_{pri}$  deve ser obtida. O método de se obter a nova matriz  $Y'_{pri}$  será tratada em detalhes no Apêndice E.

O fluxo em outras linhas do grupo é calculado pela equação do tipo (3.41), porém com todos os fatores do segundo membro recalculados para a nova configuração, isto é:

$$\bar{I}_{pq}^0 = I'_{ok} Y'_l Z'_{\alpha,k} \quad (3.67)$$

sendo:

$I'_{ok}$  - corrente de curto-circuito monofásico na barra k, para condição linha aberta;

$Y'_l$  - vetor formado pela linha da nova matriz  $Y'_{pri}$ , correspondente à linha de transmissão onde se quer calcular o fluxo;

$Z'_{\alpha,k}$  - vetor formado pela diferença dos elementos da matriz  $Z_{BARRA}^0$  recalculados para condição linha aberta pelo algoritmo (3.59) e (3.60);

$\bar{I}_{pq}^0$  - fluxo de corrente de seqüência zero na linha p-q, para a condição linha aberta.



Note-se que no estudo da condição curto em fim de linha a matriz  $Y_{pri}$  é a mesma do caso básico, pois a linha sendo aberta numa extremidade apenas, não afeta a estrutura da matriz de acoplamento  $Z_{pri}$ . Portanto tem-se:

$$\hat{I}_{pq}^0 = I_{on}'' \cdot Y_{\ell} \cdot Z_{\alpha,k}'' \quad (3.68)$$

sendo:

$I_{on}''$  - corrente de curto-circuito monofásico em fim de linha;

$Y_{\ell}$  - vetor formado pela linha da matriz  $Y_{pri}$ , correspondente à linha de transmissão onde se quer calcular o fluxo;

$Z_{\alpha,k}''$  - vetor formado pela diferença dos elementos da matriz  $Z_{BARRA}^0$ , recalculados para condição curto em fim de linha pelo algoritmo (3.65) e (3.66);

$\hat{I}_{pq}^0$  - fluxo de corrente de sequência zero na linha p-q, para a condição curto em fim de linha.

## CAPÍTULO IV

### TESTES E RESULTADOS

#### 4.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar os testes efetuados e os resultados obtidos para vários sistemas, dando ênfase às redes com indutâncias mútuas.

Foram testadas sete redes, cada qual salientando uma determinada particularidade.

Nas redes 1, 2 e 3, de dimensões reduzidas, a finalidade principal foi comparar com os resultados disponíveis do programa NETFAULT da PECO (Philadelphia Electric Company). Os outros testes foram realizados com sistemas reais da região sudeste brasileira.

Nas redes 1 e 2 foram consideradas somente as reatâncias ( $jx$ ) nos parâmetros das linhas, enquanto que nas demais foram consideradas as impedâncias na forma complexa ( $r + jx$ ).

Os parâmetros das redes foram dados em valores percentuais, na base de 100 MVA.

Neste trabalho, em sistemas que apresentam grupos paralelos de linhas mutuamente acopladas não é necessário a criação de barras fictícias, o que para redes com alto grau de acoplamentos mútuos implica numa economia considerável de barras e linhas. Por exemplo, se fosse utilizado o programa da PECO, a rede 7 que tem 32 barras e 73 linhas passaria a ter 68 barras e 111 linhas.

#### 4.2. Descrição das redes testadas

Sejam,

NB = número de barras;  
NL = número de linhas;  
NLIN = número de linhas com acoplamentos mútuos;  
NMUT = número de acoplamentos mútuos;  
NBLO = número de grupos de linhas com acoplamentos mútuos.

e

GCOI-SE - Grupo Coordenador para Operação Interligada - Sudeste

GTP - Grupo de Trabalho de Proteção

#### REDE 1

. Dados:

NB = 3  
NL = 5  
NLIN = 3  
NMUT = 2  
NBLO = 1

. Referência: - Exemplo da pág. 184 da Ref. [26].

. Objetivo: - Comparar com os resultados disponíveis.

. Ilustração: - Diagrama unifilar - Fig. - 4.1.

#### REDE 2

. Dados:

NB = 4  
NL = 6

NLIN = 3  
NMUT = 2  
NBLO = 1

- . Referência: - Sistema exemplo da Ref. - |20|.
- . Objetivo: - Comparar com os resultados disponíveis, e verificar o ilhamento do sistema.
- . Ilustração: - Diagrama unifilar - Fig. - 4.2.

### REDE 3

- . Dados:

NB = 7  
NL = 13  
NLIN = 2  
NMUT = 1  
NBLO = 1

- . Referência: - Sistema exemplo do Manual de Procedimentos usados pelo GTP - março de 1978.
- . Objetivo: - Comparar com os resultados disponíveis no Manual.
- . Ilustração: - Diagrama unifilar - Fig. - 4.3.

### REDE 4

- . Dados:

NB = 18  
NL = 37

NLIN = 20

NMUT = 12

NBLO = 8

Parte do sistema CPFL, área de Campinas.

. Referência: - Diagrama de impedância do GTP do GCOI-SE - Configuração março de 1979.

. Objetivo: - Foi utilizada intensamente durante os testes da subrotina que forma as matrizes de acoplamento  $Z_{pri}$  (e a sua inversa  $Y_{pri}$ ) e da subrotina que inclui o efeito dos acoplamentos mútuos na rede de sequência zero.

. Ilustração: - Diagrama unifilar - Fig. - 4.4.

#### REDE 5

. Dados

NB = 203

NL = 405

NLIN = 80

NMUT = 16

NBLO = 37

Sistema interligado da região sudeste, composto pelas seguintes empresas: CPFL, CESP, FURNAS, LIGHT-RIO e CEMIG.

O sistema interligado foi preparado em função da rede da CPFL, isto é, levou-se em consideração as partes das empresas interligadas com influências maiores no sistema CPFL, deixando de considerar sistemas distantes.

- . Referência: - Diagrama de impedância do GTP do GCOI-SE - Configuração março de 1979.
- . Objetivo: - Teste de um sistema de dimensão relativamente grande e cálculos de curto-circuitos no sistema CPFL.
- . Ilustração: - Empresas interligadas - Fig. - 4.5a e diagramas unifilares 4.5b e 4.5c.

#### REDE 6

. Dados:

NB	=	72
NL	=	129
NLIN	=	45
NMUT	=	48
NBLO	=	15

Sistema interligado considerando-se o sistema CEB e partes dos sistemas FURNAS e CELG.

- . Referência: - Diagrama de impedância do GTP do GCOI-SE - Configuração julho de 1981.
- . Objetivo: - Teste de um sistema apresentando grupos de linhas com acoplamentos mútuos com mais de tres linhas envolvidas.
- . Ilustração: - Diagramas unifilares dos grupos de linhas com mútuas - Figs. - 4.6a, 4.6b e 4.6c.

REDE 7

. Dados:

NB = 32  
NL = 73  
NLIN = 47  
NMUT = 99  
NBLO = 11

Sistema interligado considerando-se o sistema LIGHT-RIO e parte do sistema FURNAS.

- . Referência: - Diagrama de impedância do GTP do GCOI-SE - Configuração março de 1979.
- . Objetivo: - Teste de um sistema apresentando alto grau de acoplamentos mútuos.
- . Ilustração: - Diagrama unifilar - Fig. - 4.7.

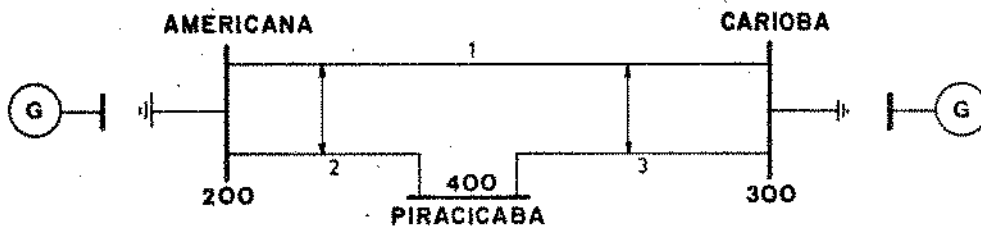


Fig. 4.1 Diagrama unifilar da REDE 1.

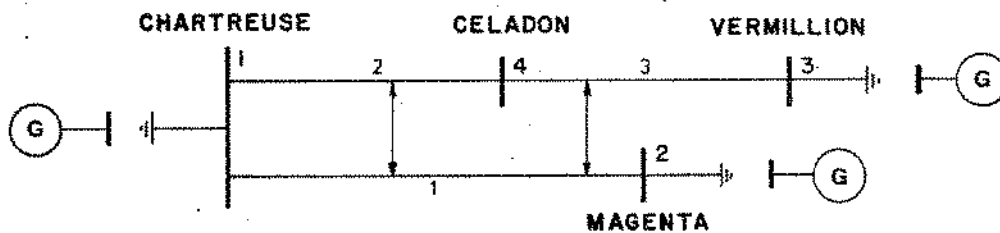


Fig. 4.2 Diagrama unifilar da REDE 2.

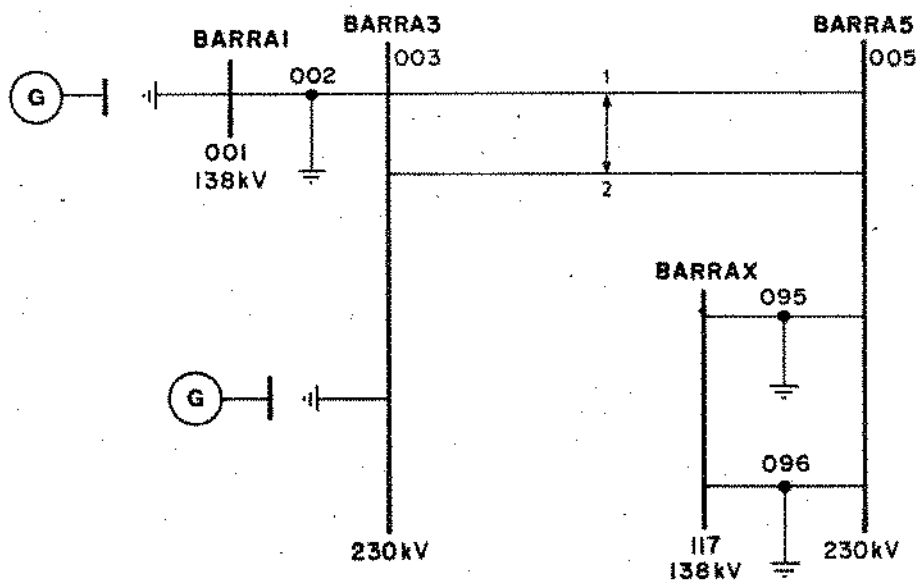


Fig. 4.3 Diagrama unifilar da REDE 3.



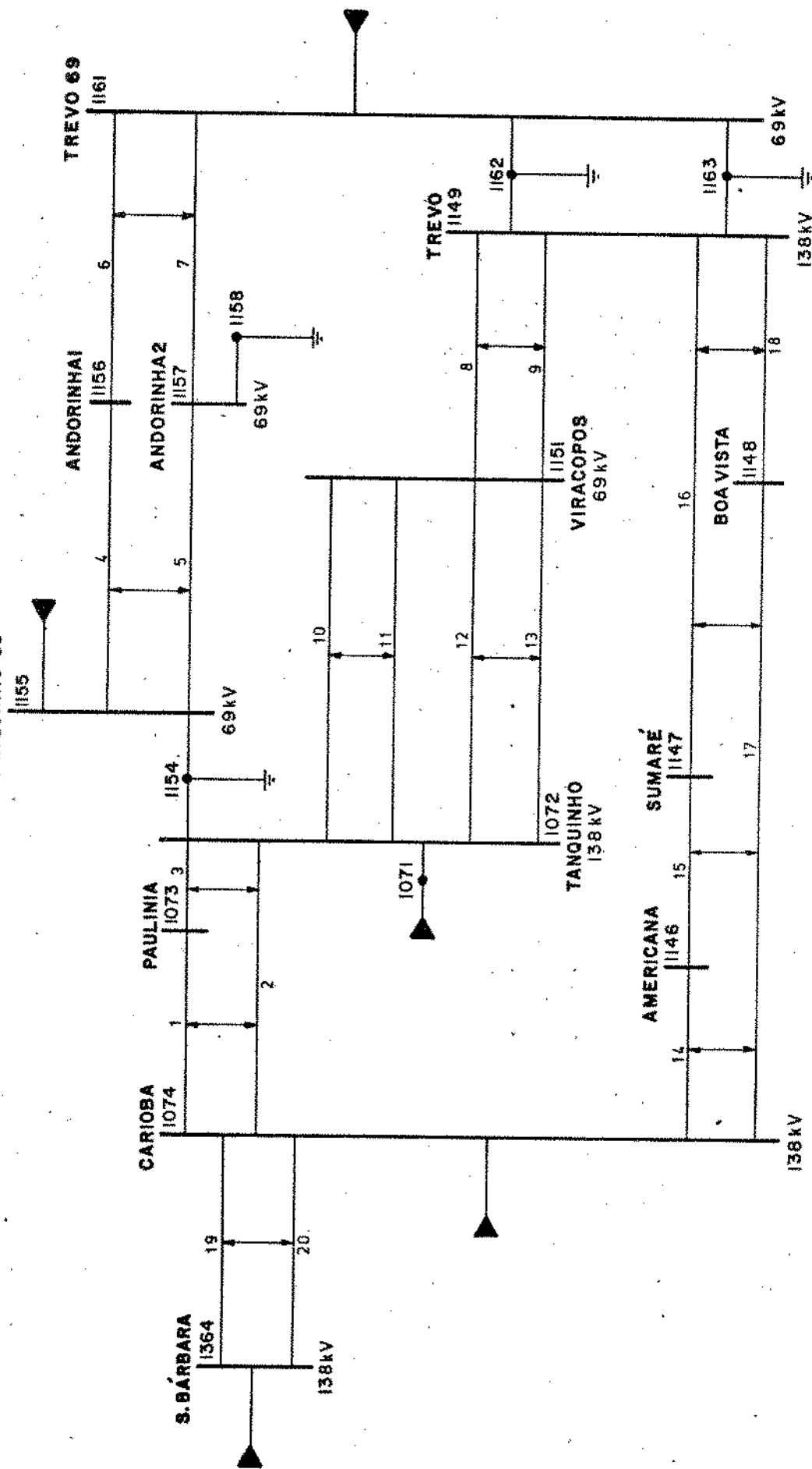


Fig. 4.4 Diagrama unifilar da REDE 4.

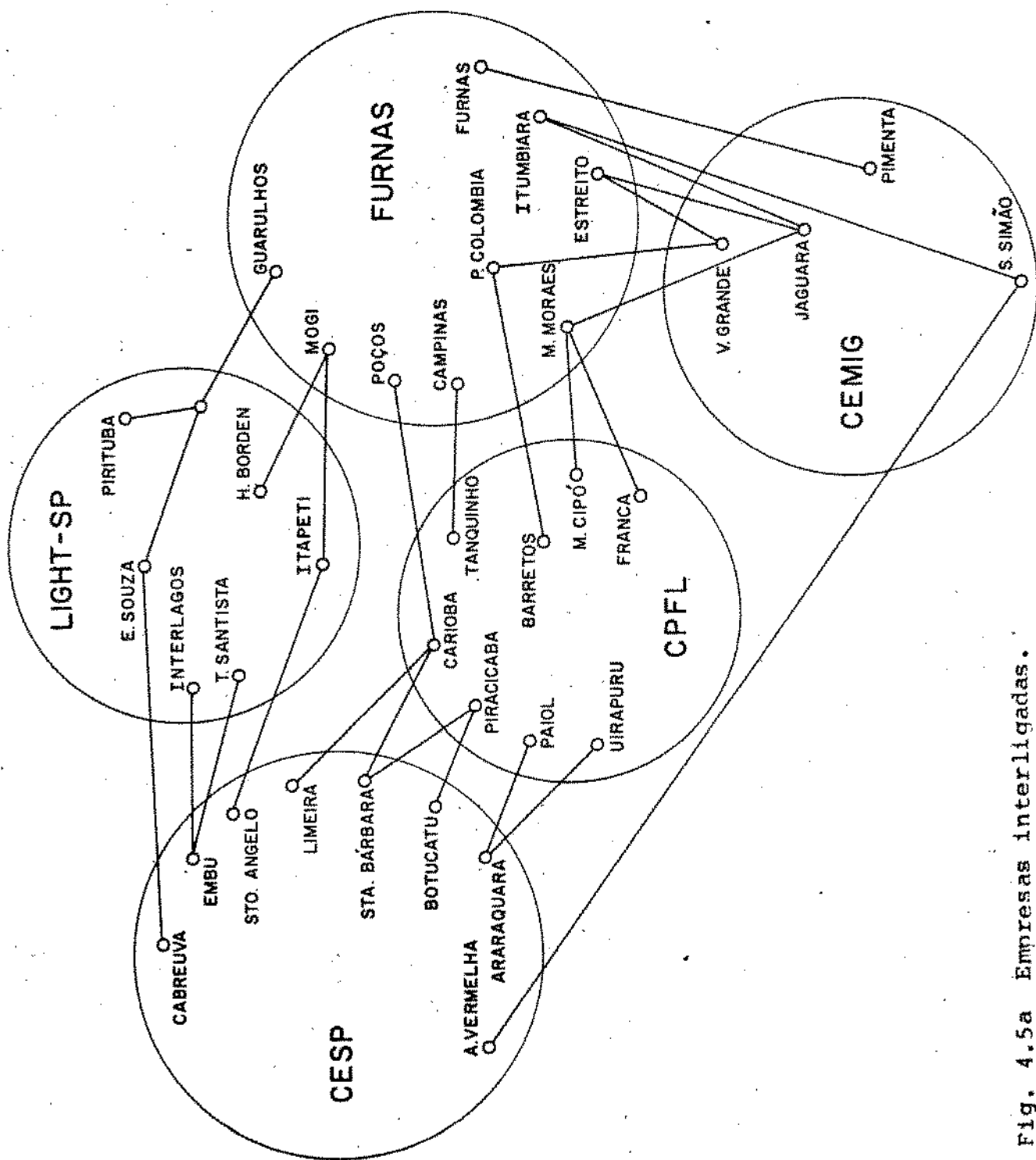


Fig. 4.5a Empresas interligadas.

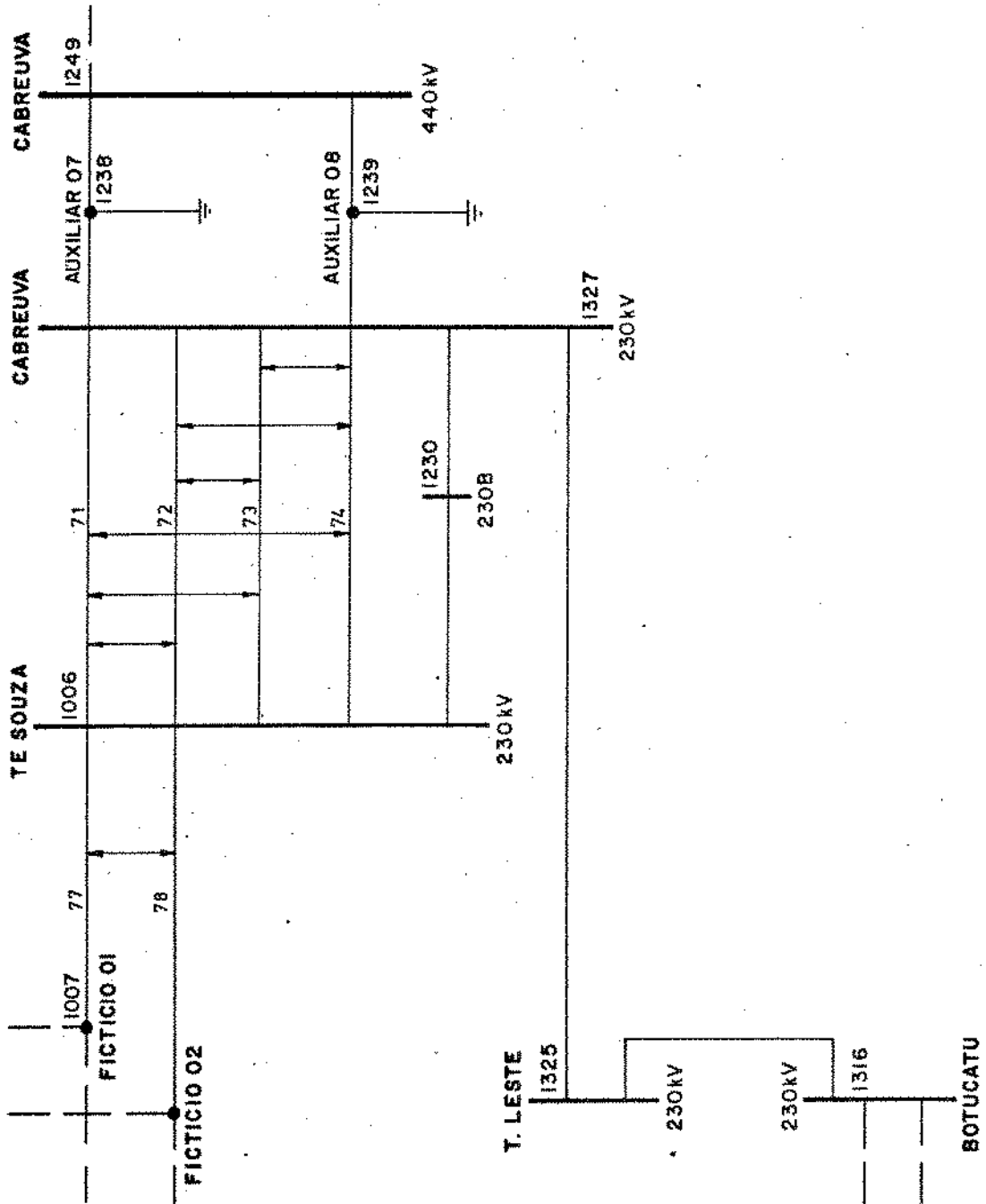


Fig. 4.5b Diagrama unifilar de um trecho da REDE 5.

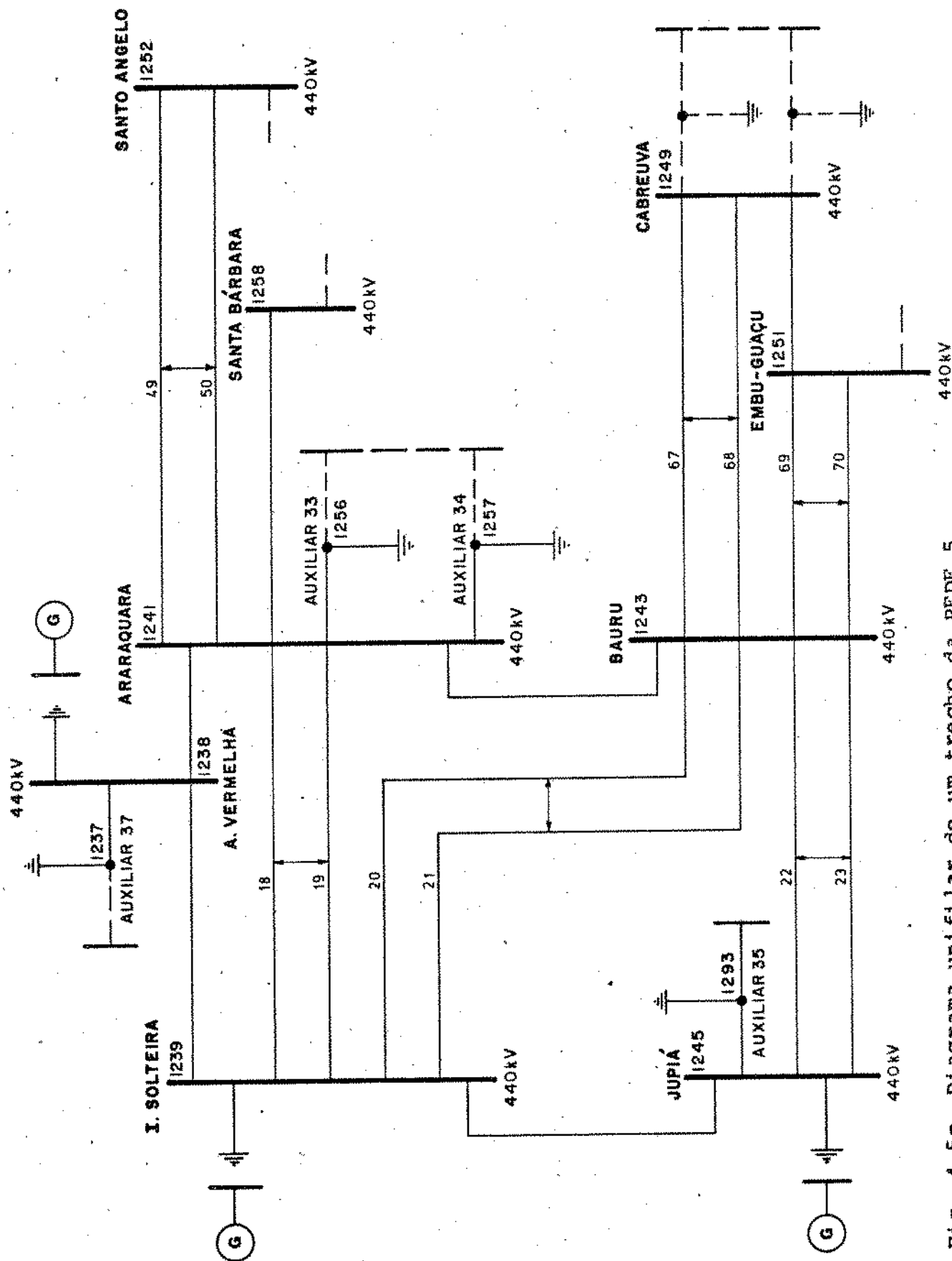


Fig. 4.5c Diagrama unifilar de um trecho da REDE 5.

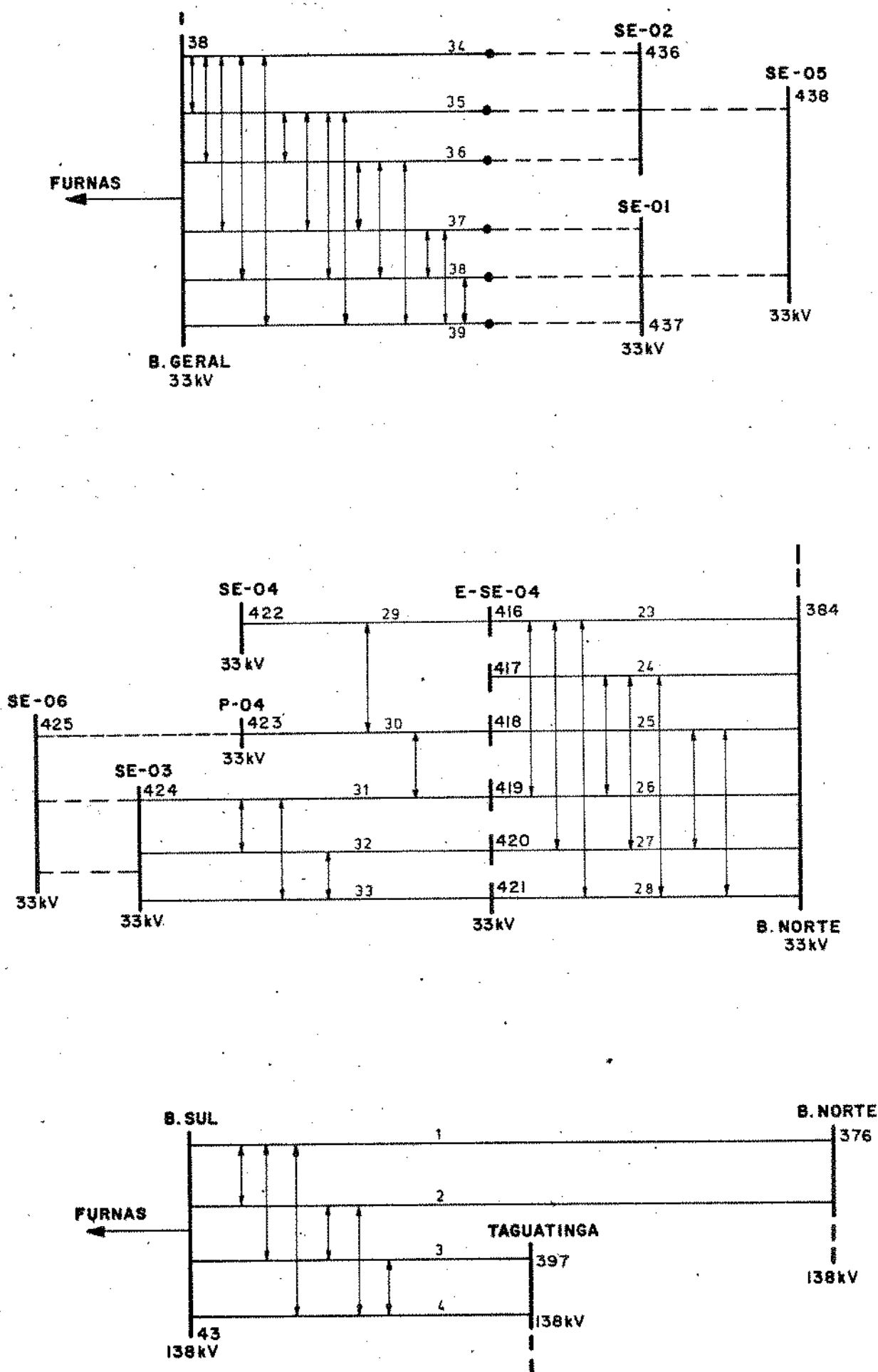
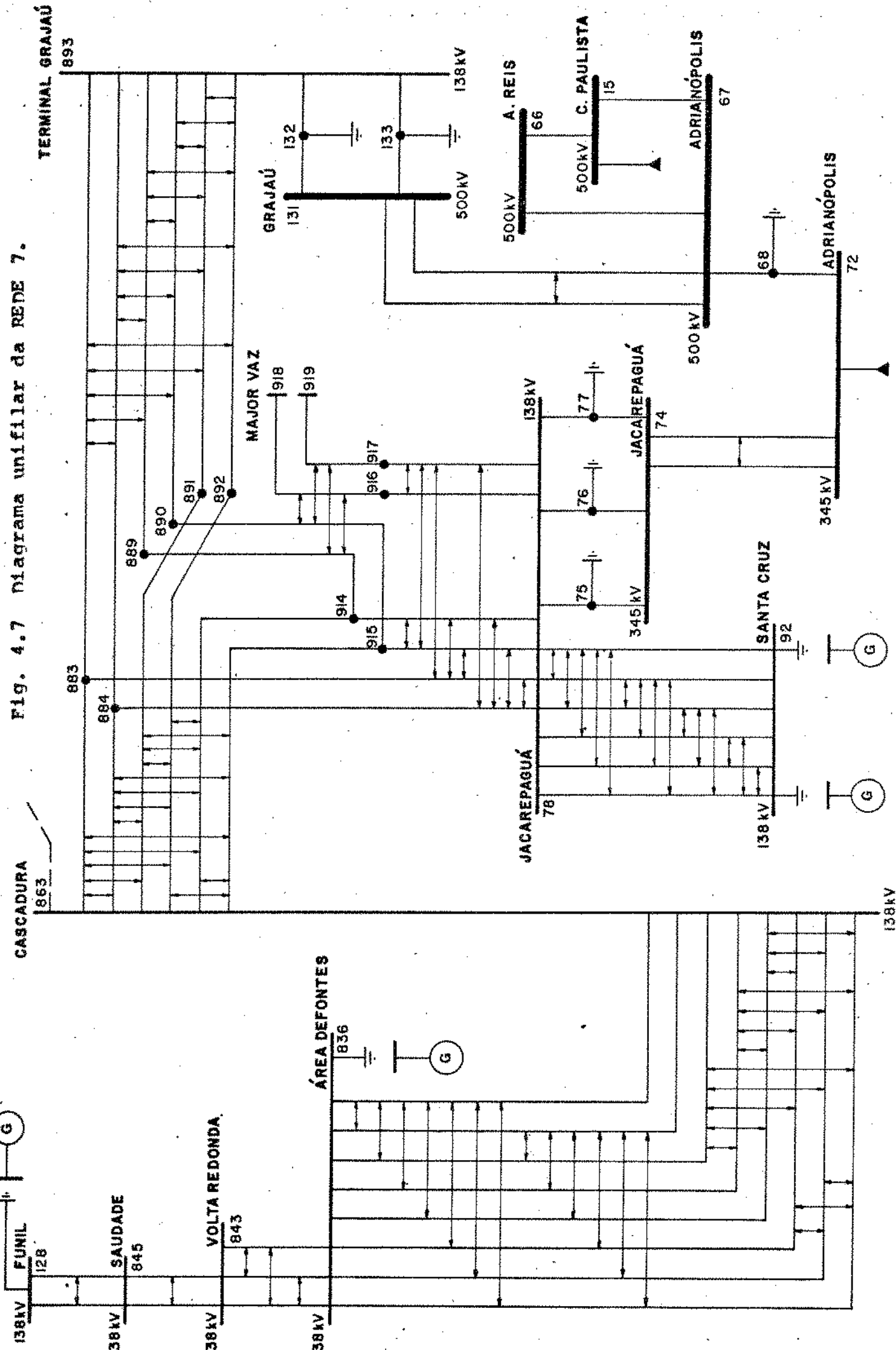


Fig. 4.6 Diagramas unifilares dos grupos de mûtuas, da REDE 6.

Fig. 4.7 Diagrama unifilar da REDE 7.



#### 4.3. Resultados

São apresentados os resultados de uma barra, escolhida convenientemente para as condições básica, linha aberta e curto-circuito em fim de linha.

##### REDE 1

. Barra curto-circuitada: - AMERICANA (200)

. Referência: - Fig. - 4.1.

. Ilustrações: - Condição básica - Tab. - 4.1.

Linha aberta: AMERICANA - PIRACICABA  
(2) - Tab. - 4.2.

Curto em fim de linha: terminal PIRACICABA - Tab. - 4.3.

##### REDE 2

. Barra curto-circuitada: CHARTREUSE (1).

. Referência: - Fig. - 4.2.

. Ilustrações: - Condição básica - Tab. - 4.4.

Linha aberta: CHARTREUSE - CELADON  
(2) - Tab. - 4.5.

Curto em fim de linha: terminal CELADON - Tab. - 4.6.

##### REDE 3

. Barra curto-circuitada: BARRA 3 230KV (003).

. Referência: - Fig. - 4.3.

. Ilustrações: - Condição básica - Tab. - 4.7.

Linha aberta: BARRA 3 230KV - BARRA  
5 230KV (2) - Tab. - 4.8.

Curto em fim de linha: terminal BAR-  
RA 5 230KV - Tab. - 4.9.

#### REDE 4

. Barra curto-circuitada: TANQUINHO (1072)

. Referência: - Fig. - 4.4.

. Ilustrações: - Condição básica - Tab. - 4.10.

Linha aberta: TANQUINHO - VIRACOPOS  
(13) - Tab. - 4.11.

Curto em fim de linha: terminal VIRA  
COPOS - Tab. - 4.12.

#### REDE 5

. Barra curto-circuitada: CABREUVA 230KV (1327).

. Referência: - Fig. - 4.5b.

. Ilustrações: - Condição básica - Tab. - 4.13.

Linha aberta: CABREUVA - T.E. SOUZA  
(74) - Tab. - 4.14.

Curto em fim de linha: terminal T.E.  
SOUZA - Tab. - 4.15.



- . Barra curto-circuitada: ILHA SOLTEIRA 440KV (1239).
- . Referência: - Fig. - 4.5c.
- . Ilustrações: - Condição básica - Tab. - 4.16.

Linha aberta: ILHA SOLTEIRA - JUPIÁ  
(1) - Tab. - 4.17.

Curto em fim de linha: terminal JU-  
PIÁ - Tab. - 4.18.

#### REDE 6

- . Barra curto-circuitada: - BRA-NORTE-33 (383).
- . Referência: - Fig. - 4.6b.
- . Ilustrações: - Condição básica - Tab. - 4.19.

Linha aberta: BRA-NORTE-33 - E-SE/04  
--06 (28) - Tab. - 4.20.

Curto em fim de linha: terminal E-SE/  
04--6 - Tab. - 4.21.

#### REDE 7

- . Barra curto-circuitada: - CASCADURA 138 (863).
- . Referência: - Fig. 4.7.
- . Ilustrações: - Condição básica - Tab. 4.22.

Linha aberta: CASCADURA 138 - FICTÍ-  
CIO 47 (19) - Tab. - 4.23.

Curto em fim de linha: terminal FIC-  
TÍCIO 47 - Tab. - 4.24.

\*\*\*\*\*CASO BASICO\*\*\*\*\*

BARRA EM ESTUDO: AMERICANA  
Tab. 4.1 Estudo da REDE 1  
Condição básica

\*\*\*\*\*CURTO 1F/T\*\*\*\*\*  
MVA TOTAL E1 E0  
1431.3 0.582 0.164  
-90.00 0.00 0.00  
\*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL  
1141.6  
-90.00

MAGNITUDES  
ANGULOS

*****C O N T R I B U I C O E S*****			*****CURTO 1F/T*****			*****CURTO 3F*****		
			E1	E0	211+I0	I0	V	MVA
0	REFERENCIA	200 AMERICANA	1.000	0.000	1284.5	469.0	1.000	975.6
			0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00
400	PIRACICABA	200 AMERICANA	0.721	0.100	73.4	4.0	0.332	83.0
			0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00
300	CARIOBA	200 AMERICANA	0.929	0.003	73.4	4.0	0.830	83.0
			0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00
0	REFERENCIA	300 CARIOBA	1.000	0.000	146.8	8.1	1.000	166.0
			0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00

\*\*\*\*\*C I R C\*\*\*\*\*  
1  
2  
1  
1

\*-LINHA ABERTA: AMERICANA - PIRACICARA

BARRA EM ESTUDO: AMERICANA  
Tab. 4.2 Estudo da REDE 1  
Linha aberta

*-----CURTO IF/T-----*	*CURTO 3F*
MVA TOTAL	MVA TOTAL
1350.8	1066.3
0.578	0.155
0.00	0.00
	MAGNITUDES
	ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*			*-----CURTO IF/T-----*			*-----CURTO 3F-----*		
CIRC			E1	E0	2I1+I0	I0	V	MVA
0 REFERENCIA	200 AMERICANA	1	1.000	0.000	1268.1	444.1	1.000	975.6
			0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00
300 CARIOSA	200 AMERICANA	1	0.961	0.002	82.7	6.1	0.907	90.7
			0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00
0 REFERENCIA	300 CARIOSA	1	1.000	0.000	82.7	6.1	1.000	90.7
			0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00

\*-CURTO EM FIM DE LINHA: AMERICANA - PIRACICARA

BARRA EM ESTUDO: AMERICANA                      Tab. 4.3    Estudo da REDE 1  
Curto em fim de linha

\*-----CURTO IF/T-----\*    \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL    E1    E0    MVA TOTAL  
160.8    0.950    0.014    202.5  
-90.00    0.00    0.00    -90.00

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*				*-----CURTO 1F/T-----*				*---CURTO 3F---*		
CIRC				E1	E0	2I1+I0	I0	V	MVA	
0	REFERENCIA	200	AMERICANA	1	1.000	0.000	138.4	40.4	1.000	185.3
					0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00
300	CARIOBA	200	AMERICANA	1	0.995	0.005	22.4	13.2	0.982	17.2
					0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00
0	REFERENCIA	300	CARIOBA	1	1.000	0.000	22.4	13.2	1.000	17.2
					0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00

\*\*\*\*\*CASO BASICO\*\*\*\*\*

BARRA EM ESTUDO: CHARTREUSE  
Tab. 4.4 Estudo da REDE 2  
Condição básica

\*\*\*\*\*CURTO IF/T\*\*\*\*\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E0 MVA TOTAL  
1817.7 0.761 0.522 2535.7  
-90.00 0.00 0.00 -90.00

MAGNITUDES  
ANGULOS

*****C O N T R I B U I C O E S*****			*****CURTO IF/T*****		*****CURTO 3F*****	
			E1	E0	2I1+I0	I0
0 REFERENCIA	1 CHARTREUSE	1	1.000	0.000	1477.9	522.1
4 CELADON	1 CHARTREUSE	2	0.821	0.400	-90.00	-90.00
3 VERMILLION	4 CELADON	3	0.000	0.000	158.1	38.7
0 REFERENCIA	3 VERMILLION	1	0.881	0.193	-90.00	-90.00
2 MAGENTA	1 CHARTREUSE	1	0.000	0.000	158.1	38.7
0 REFERENCIA	2 MAGENTA	1	0.000	0.000	-90.00	-90.00
			0.863	0.226	181.7	45.1
			0.000	0.000	-90.00	-90.00
			1.000	0.000	181.7	45.1
			0.000	0.000	-90.00	-90.00

\*-LINHA ABERTA: CHARTREUSE - CELADON

Tab. 4.5 Estudo da REDE 2  
Linha aberta

BARRA EM ESTUDO: CHARTREUSE

*-----CURTO IF/T-----*		*CURTO 3F*	
MVA TOTAL	E1 E0	MVA TOTAL	
1690.1	0.754 0.507	2285.7	
-90.00	0.00 0.00	-90.00	

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*									
		CURTO		IF/T-----*		*--CURTO		3F----	
		E1	E0	2I1+I0	I0	V		MVA	
0	REFERENCIA	1	CHARTREUSE	1	CIRC				
		1.000	0.000	1493.0	507.0	1.000	2000.0		
		0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00		
3	VERMILLION	4	CELADON	3		1.000	0.0		
		1.000	0.000	0.0	0.0	1.000	90.00		
		0.00	-180.00	90.00	90.00	0.00	0.0		
0	REFERENCIA	3	VERMILLION	1		1.000	0.0		
		1.000	0.000	0.0	0.0	1.000	90.00		
		0.00	0.00	90.00	90.00	0.00	0.0		
2	MAGENTA	1	CHARTREUSE	1		0.459	0.282	197.2	56.3
		0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	0.0	-90.00	
0	REFERENCIA	2	MAGENTA	1		1.000	0.000	197.2	56.3
		0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	0.0	-90.00	

\*\*-CURTO EM FIM DE LINHA: CHARTREUSE - CELADON

Tab. 4.6 Estudo da REDE 2  
Curto em fim de linha

BARRA EM ESTUDO: CHARTREUSE

*****CURTO IF/T*****			*CURTO 3F*	
MVA TOTAL	E1	E0	MVA TOTAL	
547.9	0.920	0.146	695.7	
-90.00	0.00	0.00	-90.00	

MAGNITUDES  
ANGULOS

*****C O N T R I B U I C O E S*****										CIRC	
*****CURTO IF/T*****										3F**	
E1 E0 2I1+I0 IO V MVA											
0 REFERENCIA	1	CHARTREUSE	1	1.000	0.000	465.8	146.1	1.000	608.7		
				0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00		
3 VERMILLION	4	CELADON	3	1.000	0.000	0.0	0.0	1.000	0.0		
				0.00	-180.00	90.00	90.00	0.00	90.00		
0 REFERENCIA	3	VERMILLION	1	1.000	0.000	0.0	0.0	1.000	0.0		
				0.00	0.00	90.00	90.00	0.00	90.00		
2 MAGENTA	1	CHARTREUSE	1	0.954	0.183	82.2	36.5	0.826	87.0		
				0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00		
0 REFERENCIA	2	MAGENTA	1	1.000	0.000	82.2	36.5	1.000	87.0		
				0.00	0.00	-90.00	-90.00	0.00	-90.00		

\*\*\*\*\*CASO BASICO\*\*\*\*\*

BARRA EM ESTUDO: BARRA3 230KV

\*\*\*\*\*CURTO IF/T\*\*\*\*\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 E0 HVA TOTAL  
937.8 0.564 0.128 717.0  
-89.75 -0.11 -0.95 -89.89

MAGNITUDES  
ANGULOS

Tab. 4.7 Estudo da REDE 3  
Condição básica

*****C O N T R I B U I C O E S*****										*--CURTO		3F----		
										V		MVA		
CIRC										IO				
										2I1+IO				
E1										E0				
0	REFERENCIA	3	BARRA3	230KV	1	1.000	0.000	680.9	215.7	1.000	533.6			
						0.00	0.00	-90.21	-90.95	0.00	-90.00			
5	BARRA5	230KV	3	BARRA3	230KV	2	0.565	0.028	13.1	12.6	0.001	0.7		
						-0.07	14.11	-74.50	-75.89	32.85	-45.06			
96	AUXILIAR	03	5	BARRA5	230KV	1	0.565	0.019	13.2	12.7	0.002	0.7		
						-0.06	14.11	-74.50	-75.89	36.17	-45.06			
0	REFERENCIA	96	AUXILIAR	03	1	1.000	0.000	12.9	12.4	1.000	0.7			
						0.00	0.00	-74.48	-75.89	0.00	-45.07			
95	AUXILIAR	02	5	BARRA5	230KV	1	0.565	0.019	13.1	12.5	0.002	0.7		
						-0.06	14.11	-74.50	-75.89	36.17	-45.06			
0	REFERENCIA	95	AUXILIAR	02	1	1.000	0.000	13.3	12.8	1.000	0.7			
						0.00	0.00	-74.52	-75.89	0.00	-45.07			
5	BARRA5	230KV	3	BARRA3	230KV	1	0.565	0.028	13.1	12.6	0.001	0.7		
						-0.07	14.11	-74.50	-75.89	32.85	-45.06			
2	AUXILIAR	01	3	BARRA3	230KV	1	0.626	0.072	231.6	72.5	0.141	182.4		
						-0.07	-0.95	-90.12	-90.95	0.12	-89.88			
0	REFERENCIA	2	AUXILIAR	01	1	1.000	0.000	33.8	33.4	1.000	0.6			
						0.00	0.00	-90.30	-90.95	0.00	-45.02			
1	BARRA1	138KV	2	AUXILIAR	01	1	0.619	0.075	197.8	39.1	0.126	182.0		
						-0.07	-0.95	-90.09	-90.95	0.13	-90.02			
0	REFERENCIA	1	BARRA1	138KV	1	1.000	0.000	197.8	39.1	1.000	182.0			
						0.00	0.00	-90.09	-90.95	0.00	-90.02			



\*-LINHA ABERTA: BARRA3 230KV - BARRAS 230KV

BARRA EM ESTUDO: BARRA3 230KV

Tab. 4.8 Estudo da REDE 3  
Linha aberta

\*-----CURTO 1F/T-----\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 E0 MVA TOTAL  
935.7 0.565 0.130 717.0  
-89.80 -0.07 -0.61 -89.89

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*										*-----CURTO 1F/T-----*		*-----CURTO 3F-----*			
										E1	E0	211+10	I0	V	MVA
CIRC															
0	REFERENCIA	3	BARRA3	230KV	1	1.000	0.000	683.2	218.9	1.000	533.6				
						0.00	0.00	-90.13	-90.61	0.00	-90.00				
96	AUXILIAR	03	5	BARRA5	230KV	1	0.566	0.015	10.5	9.9	0.003	0.7			
						0.01	12.28	-75.90	-77.72	34.73	-45.11				
0	REFERENCIA	96	AUXILIAR	03	1	1.000	0.000	10.2	9.7	1.000	0.7				
						0.00	0.00	-75.86	-77.72	0.00	-45.11				
95	AUXILIAR	02	5	BARRA5	230KV	1	0.566	0.015	10.4	9.9	0.003	0.7			
						0.01	12.28	-75.89	-77.72	34.73	-45.10				
0	REFERENCIA	95	AUXILIAR	02	1	1.000	0.000	10.6	10.1	1.000	0.7				
						0.00	0.00	-75.92	-77.72	0.00	-45.11				
5	BARRA5	230KV	3	BARRA3	230KV	1	0.566	0.022	20.8	19.8	0.003	1.4			
						-0.00	12.28	-75.89	-77.72	32.81	-45.11				
2	AUXILIAR	01	3	BARRA3	230KV	1	0.627	0.073	232.3	73.6	0.141	182.4			
						-0.04	-0.61	-90.05	-90.61	0.12	-89.88				
0	REFERENCIA	2	AUXILIAR	01	1	1.000	0.000	34.3	33.9	1.000	0.6				
						0.00	0.00	-89.98	-90.61	0.00	-45.02				
1	BARRA1	138KV	2	AUXILIAR	01	1	0.620	0.076	198.0	39.7	0.126	182.0			
						-0.04	-0.61	-90.06	-90.61	0.13	-90.02				
0	REFERENCIA	1	BARRA1	138KV	1	1.000	0.000	198.0	39.7	1.000	182.0				
						0.00	0.00	-90.06	-90.61	0.00	-90.02				

\*-CURTO EM FIM DE LINHA: BARRA3 230KV - BARRAS 230KV

BARRA EM ESTUDO: BARRA3 230KV      Tab. 4.9      Estudo da REDE 3  
Curto em fim de linha

\*-----CURTO 1F/T-----\*      \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL      E1      EO      MVA TOTAL  
261.8      0.880      0.023      297.3  
-82.05      -1.08      16.03      -82.85

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*			*-----CURTO 1F/T-----*		*-----CURTO 3F-----*				
CIRC			E1	EO	IO	V			
0	REFERENCIA	3 BARRA3 230KV	1	1.000	0.000	158.0	38.4	1.000	221.2
				0.00	0.00	-80.29	-73.97	0.00	-82.96
96	AUXILIAR 03	5 BARRAS 230KV	1	0.880	0.028	18.8	18.7	0.592	0.3
				-1.06	-3.25	-92.82	-93.25	-4.84	-38.07
0	REFERENCIA	96 AUXILIAR 03	1	1.000	0.000	18.4	18.3	1.000	0.3
				0.00	0.00	-92.81	-93.25	0.00	-38.07
95	AUXILIAR 02	5 BARRAS 230KV	1	0.880	0.028	18.6	18.5	0.592	0.3
				-1.06	-3.25	-92.82	-93.25	-4.84	-38.06
0	REFERENCIA	95 AUXILIAR 02	1	1.000	0.000	19.0	18.9	1.000	0.3
				0.00	0.00	-92.83	-93.25	0.00	-38.07
5	BARRAS 230KV	3 BARRA3 230KV	1	0.880	0.042	37.4	37.2	0.592	0.6
				-1.07	-3.25	-92.82	-93.25	-4.86	-38.06
2	AUXILIAR 01	3 BARRA3 230KV	1	0.897	0.013	57.2	12.9	0.648	75.6
				-0.91	16.03	-80.23	-73.97	-3.85	-82.84
0	REFERENCIA	2 AUXILIAR 01	1	1.000	0.000	6.1	5.9	1.000	0.3
				0.00	0.00	-73.13	-73.97	0.00	-37.98
1	BARRA1 138KV	2 AUXILIAR 01	1	0.895	0.013	51.2	7.0	0.642	75.5
				-0.93	16.03	-81.07	-73.97	-3.95	-82.98
0	REFERENCIA	1 BARRA1 138KV	1	1.000	0.000	51.2	7.0	1.000	75.5
				0.00	0.00	-81.07	-73.97	0.00	-82.98

\*\*\*\*\*CASO BASICO\*\*\*\*\*

BARRA EM ESTUDO: TANQUINHO

*****CURTO IF/T*****		*CURTO 3F*	
MVA TOTAL	E1	EO	MVA TOTAL
3076.7	0.671	0.343	3120.6
-85.88	0.52	2.04	-84.82

MAGNITUDES  
ANGULOS

Tab. 4.10 Estudo da REDE 4  
Condição básica

*****C O N T R I B U I C O E S*****		*CURTO		IF/T*****		*--CURTO		3F--*	
		+1	EO	2I+IO	IO	V	MVA		
1151 VIRACOPOS	1072 TANQUINHO	0.712	0.220	89.9	20.2	0.125	106.1		
		0.03	4.84	-76.25	-76.28	-6.87	-75.19		
1149 TREVO	1151 VIRACOPOS	0.726	0.181	179.1	38.8	0.167	213.4		
		-0.12	6.53	-76.61	-76.32	-6.99	-75.63		
1149 TREVO	1151 VIRACOPOS	0.726	0.181	179.1	38.8	0.167	213.4		
		-0.12	6.53	-76.61	-76.32	-6.99	-75.63		
1151 VIRACOPOS	1072 TANQUINHO	0.712	0.220	90.6	20.2	0.125	107.1		
		0.03	4.84	-77.39	-76.32	-6.87	-76.64		
1151 VIRACOPOS	1072 TANQUINHO	0.712	0.220	88.8	18.6	0.125	106.8		
		0.03	4.84	-76.46	-76.32	-6.87	-75.44		
1151 VIRACOPOS	1072 TANQUINHO	0.712	0.220	88.8	18.6	0.125	106.7		
		0.03	4.84	-76.33	-76.38	-6.87	-75.25		
1154 AUXILIAR 13	1072 TANQUINHO	0.725	0.165	128.3	79.9	0.164	73.9		
		-1.14	1.25	-84.92	-87.23	9.94	-80.06		
0 REFERENCIA	1154 AUXILIAR 13	1.000	0.000	62.8	62.5	1.000	0.6		
		0.00	0.00	-88.52	-88.75	0.00	-46.94		
1155 TANQUINHO 69	1154 AUXILIAR 13	0.723	0.167	65.7	17.4	0.158	73.4		
		1.12	1.32	-81.48	-81.77	9.95	-80.31		
0 REFERENCIA	1155 TANQUINHO 69	1.000	0.000	27.4	7.0	1.000	31.0		
		0.00	0.00	-84.75	-80.83	0.00	-85.04		
1071 ARTIFICIO	1072 TANQUINHO	0.672	0.342	2040.5	786.8	0.002	1908.4		
		0.52	2.04	-89.87	-87.96	0.00	-90.00		
0 REFERENCIA	1071 ARTIFICIO	1.000	0.000	2040.5	786.8	1.000	1908.4		
		0.00	0.00	-89.87	-87.96	0.00	-90.00		
1073 PAULINIA	1072 TANQUINHO	0.728	0.238	282.8	42.4	0.175	365.9		
		-0.29	3.21	-77.55	-73.94	-8.71	-77.13		

\*-LINHA ABERTA: TANQUINHO - VIRACOPOS

BARRA EM ESTUDO: TANQUINHO

Tab. 4.11 Estudo da REDE 4

Linha aberta

*-----CURTO IF/T-----*		*CURTO 3F*	
MVA TOTAL	E1	E0	MVA TOTAL
3063.3	0.571	0.343	3104.5
-85.90	0.52	2.03	-84.84
		MAGNITUDES	
		ANGULOS	

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*				*-----CURTO IF/T-----*				*--CURTO 3F--*	
			CIRC	F1	E0	2I1+I0	I0	V	MVA
1149 TREVO	1151 VIRACOPOS		9	0.733	0.176	165.8	37.0	0.191	195.8
				-0.19	6.74	-76.45	-76.12	-6.70	-75.49
1149 TREVO	1151 VIRACOPOS		8	0.721	0.213	165.8	37.0	0.153	195.8
				-0.05	5.06	-76.45	-76.12	-6.59	-75.49
1151 VIRACOPOS	1072 TANQUINHO		12	0.721	0.213	120.8	34.7	0.153	130.8
				-0.05	5.06	-76.99	-75.95	-6.59	-76.35
1151 VIRACOPOS	1072 TANQUINHO		11	0.721	0.213	105.5	19.7	0.153	130.5
				-0.05	5.06	-76.21	-76.25	-6.59	-75.15
1151 VIRACOPOS	1072 TANQUINHO		10	0.721	0.213	105.4	19.7	0.153	130.3
				-0.05	5.06	-76.08	-76.31	-6.59	-74.97
1154 AUXILIAR 13	1072 TANQUINHO		1	0.728	0.165	131.2	79.9	0.174	78.3
				1.13	1.23	-85.05	-87.22	9.38	-80.62
0 REFERENCIA	1154 AUXILIAR 13		1	1.000	0.000	62.6	62.3	1.000	0.6
				0.00	0.00	-88.54	-88.77	0.00	-46.96
1155 TANQUINHO 69	1154 AUXILIAR 13		1	0.726	0.166	68.8	17.7	0.167	77.4
				1.11	1.30	-81.87	-81.72	9.39	-80.86
0 REFERENCIA	1155 TANQUINHO 69		1	1.000	0.000	27.2	7.0	1.000	30.7
				0.00	0.00	-84.76	-80.85	0.00	-85.06
1071 ARTIFICIO	1072 TANQUINHO		1	0.672	0.342	2040.3	785.6	0.002	1908.4
				0.52	2.03	-89.87	-87.47	0.00	-90.00
0 REFERENCIA	1071 ARTIFICIO		1	1.000	0.000	2040.2	785.6	1.000	1908.4
				0.00	0.00	-89.87	-87.97	0.00	-90.00
1073 PAULINIA	1072 TANQUINHO		3	0.729	0.237	288.0	42.6	0.179	373.2
				-0.29	3.21	-77.41	-73.92	-8.53	-76.96
1074 CARIOBA	1072 TANQUINHO		2	0.799	0.111	287.9	42.5	0.393	373.2
				-1.12	7.54	-77.41	-73.92	-8.57	-76.96

- VIRACOPOS

\*-CURTO EM FIM DE LINHA: TANQUINHO

BARRA EM ESTUDO: TANQUINHO

Tab. 4.12 Estudo da REDE 4

Curto em fim de linha

\*-----CURTO IF/T-----\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 E0 NVA TOTAL  
514.3 0.946 0.044 670.6  
-72.90 -0.69 16.35 -71.83

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*										*-----CURTO		IF/T-----*		*-----CURTO		3F-----*			
										E1	E0	2I1+I0	I0	V	MVA				
CIRC																			
1149	TREVO	1151	VIRACOPOS	9	0.957	0.101	50.4	29.0	0.832	42.3									
					-0.63	8.86	-69.03	-73.12	-3.04	-62.48									
1149	TREVO	1151	VIRACOPOS	8	0.954	0.130	50.4	29.0	0.824	42.3									
					-0.64	6.92	-69.03	-73.12	-3.13	-62.48									
1151	VIRACOPOS	1072	TANQUINHO	12	0.954	0.130	98.6	84.2	0.824	28.3									
					-0.64	6.92	-71.33	-72.51	-3.13	-63.34									
1151	VIRACOPOS	1072	TANQUINHO	11	0.954	0.130	2.3	13.1	0.824	28.2									
					-0.64	6.92	-11.10	108.85	-3.13	-62.14									
1151	VIRACOPOS	1072	TANQUINHO	10	0.954	0.130	2.3	13.1	0.824	28.2									
					-0.64	6.92	-9.77	108.79	-3.13	-61.96									
1154	AUXILIAR	13	1072	TANQUINHO	1	0.955	0.025	17.0	8.4	0.825	16.9								
					-0.48	15.85	-70.80	-72.98	-2.38	-67.62									
0	REFERENCIA	1154	AUXILIAR	13	1.000	0.000	9.5	9.5	1.000	0.1									
					0.00	0.00	-73.90	-74.15	0.00	-33.96									
1155	TANQUINHO	69	1154	AUXILIAR	13	0.955	0.025	7.5	1.1	0.824	16.8								
					-0.48	15.89	-66.86	97.02	-2.43	-67.86									
0	REFERENCIA	1155	TANQUINHO	69	1.000	0.000	4.4	1.1	1.000	6.6									
					0.00	0.00	-71.49	-66.26	0.00	-72.05									
1071	ARTIFICIO	1072	TANQUINHO	1	0.946	0.044	311.1	100.5	0.791	412.3									
					-0.69	16.35	-76.64	-73.65	-3.52	-76.99									
0	REFERENCIA	1071	ARTIFICIO	1	1.000	0.000	311.1	100.5	1.000	412.2									
					0.00	0.00	-76.64	-73.65	0.00	-76.99									
1073	PAULINIA	1072	TANQUINHO	3	0.956	0.038	43.6	2.4	0.829	80.6									
					-0.65	15.91	-64.41	-54.17	-3.15	-63.95									
1074	CARIOBA	1072	TANQUINHO	2	0.968	0.031	43.6	2.4	0.875	80.6									
					-0.60	15.13	-64.41	-54.17	-2.75	-63.95									

\*\*\*\*\*CASO BASICO\*\*\*\*\*

BARRA EM ESTUDO: CABREUVA 230

Tab. 4.13 Estudo da REDE 5  
Condição básica

*-----CURTO IF/T-----*		*CURTO 3F*	
MVA TOTAL	E1 E0	MVA TOTAL	
9012.8	0.601 0.202	7527.0	
-84.38	0.34 2.00	-83.88	

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*				*-----CURTO IF/T-----*		*--CURTO V--*		3F--*		
CIRC				E1	E0	2I+IO	IO	V	MVA	
1325 T.LESTE	230	1327 CARREUVA	230	1	0.652	0.164	456.9	41.4	0.128	520.9
					0.15	2.27	-81.52	-74.36	-1.53	-81.72
1316 BOTUCATU	230	1325 T.LESTE	230	1	0.845	0.027	456.9	41.4	0.611	520.9
					-0.40	10.37	-81.52	-74.36	-1.69	-81.72
1006 TESOUZA	230	1327 CABREUVA	230	74	0.636	0.111	354.4	35.1	0.089	401.6
					0.18	2.62	-83.06	-68.46	-1.90	-84.14
1008 FICTICIO	02	1006 TESOUZA	230	78	0.677	0.046	843.5	114.8	0.192	916.8
					-0.11	9.08	-82.38	-70.09	-3.07	-83.79
1007 FICTICIO	01	1006 TESOUZA	230	77	0.677	0.046	858.1	113.4	0.191	936.4
					-0.10	9.14	-82.68	-70.79	-3.04	-83.96
1006 TESOUZA	230	1327 CABREUVA	230	73	0.636	0.111	361.0	41.8	0.089	401.6
					0.18	2.62	-82.85	-68.95	-1.90	-84.14
1006 TESOUZA	230	1327 CABREUVA	230	72	0.636	0.111	361.1	41.9	0.089	401.6
					0.18	2.62	-82.84	-68.93	-1.90	-84.14
1006 TESOUZA	230	1327 CABREUVA	230	71	0.636	0.111	354.3	35.0	0.089	401.6
					0.18	2.62	-83.07	-68.48	-1.90	-84.14
1330 CABREUVA230R		1327 CARREUVA	230	1	0.607	0.183	271.1	74.6	0.017	246.9
					0.30	2.04	-80.29	-73.96	-2.48	-82.18
1329 AUXILIAR	08	1327 CABREUVA	230	1	0.593	0.213	3428.1	1371.4	0.021	2576.7
					0.26	2.12	-85.03	-85.68	-174.09	-84.09
0 REFERENCIA		1329 AUXILIAR	08	1	1.000	0.000	1054.2	1053.8	1.000	0.7
					0.00	0.00	-87.86	-87.88	0.00	-44.88
1249 CABREUVA	440	1329 AUXILIAR	08	1	0.679	0.196	2375.8	321.0	0.196	2576.1
					0.92	0.75	-83.77	-78.42	5.90	-84.10
1328 AUXILIAR	07	1327 CABREUVA	230	1	0.593	0.213	3428.1	1371.4	0.021	2576.7
					0.26	2.12	-85.03	-85.68	-174.09	-84.09



\*--CURTO EM FIM DE LINHA: CABREUVA 230 - TESOUZA 230

BARRA EM ESTUDO: CABREUVA 230

Tab. 4.15 Estudo da REDE 5  
Curto em fim de linha

\*-----CURTO 1F/T-----\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 EO MVA TOTAL  
2282.0 0.898 0.031 2811.8  
-81.88 -0.22 6.73 -82.85

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*				*--CURTO		1F/T-----*		*--CURTO		3F--*			
				E1	EO	211+10	10	V	4VA				
CIRC													
1325 T.LESTE	230	1327 CABREUVA	230	1	0.911	0.026	112.3	6.5	0.673	195.8			
					-0.21	7.00	-79.16	-69.63	-0.60	-80.71			
1316 BOTUCATU	230	1325 T.LESTE	230	1	0.961	0.004	112.3	6.5	0.854	195.8			
					-0.19	15.10	-79.16	-69.63	-0.63	-80.71			
1008 FICTICIO	02	1006 TESOUZA	230	78	0.920	0.065	345.1	164.8	0.703	333.4			
					-0.24	-3.94	-82.32	-82.93	-0.76	-82.73			
1007 FICTICIO	01	1006 TESOUZA	230	77	0.920	0.065	347.0	162.8	0.703	340.5			
					-0.24	-3.88	-82.73	-83.63	-0.75	-82.91			
1006 TESOUZA	230	1327 CABREUVA	230	73	0.910	0.158	450.1	349.2	0.666	186.4			
					-0.22	-10.33	-82.50	-82.59	-0.63	-83.15			
1006 TESOUZA	230	1327 CABREUVA	230	72	0.910	0.158	117.7	18.6	0.666	186.4			
					-0.22	-10.33	-86.43	-110.02	-0.63	-83.15			
1006 TESOUZA	230	1327 CABREUVA	230	71	0.910	0.158	167.2	66.7	0.666	186.4			
					-0.22	-10.33	-85.20	-89.77	-0.63	-83.15			
1330 CABREUVA230H		1327 CABREUVA	230	1	0.900	0.057	45.1	105.2	0.632	114.6			
					-0.23	-2.80	77.34	90.34	-0.62	-81.20			
1329 AUXILIAR	08	1327 CABREUVA	230	1	0.896	0.033	738.9	213.5	0.617	971.2			
					-0.24	6.85	-81.78	-80.98	-0.71	-83.07			
0 REFERENCIA		1329 AUXILIAR	08	1	1.000	0.000	164.4	164.3	1.000	0.3			
					0.00	0.00	-83.12	-83.15	0.00	-43.86			
1249 CABREUVA	440	1329 AUXILIAR	08	1	0.918	0.029	574.5	49.6	0.698	971.0			
					-0.05	5.51	-81.40	-73.79	0.18	-83.08			
1328 AUXILIAR	07	1327 CABREUVA	230	1	0.896	0.033	738.9	213.5	0.617	971.2			
					-0.24	6.85	-81.78	-80.98	-0.71	-83.07			
0 REFERENCIA		1328 AUXILIAR	07	1	1.000	0.000	164.4	164.3	1.000	0.3			
					0.00	0.00	-83.12	-83.15	0.00	-43.86			



Tab. 4.16 Estudo da REDE 5  
Condição básica

\*\*\*\*\*CASO BASICO\*\*\*\*\*

BARRA EM ESTUDO: ISOLTEIRA440

*****CURTO IF/T*****		*CURTO 3F*	
MVA TOTAL	E1	E0	MVA TOTAL
23752.4	0.600	0.200	19793.6
-88.55	0.06	0.37	-88.46

MAGNITUDES  
ANGULOS

*****C O N T R I B U I C O E S*****		*CURTO		IF/T		*CURTO		3F	
		E1	E0	2I1+I0	I0	V	MVA		
O REFERENCIA		1.000	0.000	16031.8	7143.0	1.000	11111.1		
1245 JUPIA		0.00	0.00	-89.89	-89.63	0.00	-90.00		
O REFERENCIA		0.737	0.028	3257.6	415.9	0.343	3558.3		
1293 AUXILIAR		-0.26	11.99	-86.28	-77.99	-1.57	-87.40		
O REFERENCIA		1.000	0.000	2827.2	397.9	1.000	3044.9		
1243 BAURU		0.00	0.00	-87.70	-78.01	0.00	-89.18		
O REFERENCIA		0.848	0.004	277.5	25.9	0.622	314.5		
1251 EMBUGUACU440		1.55	1.62	-76.60	-76.07	5.25	-76.56		
O REFERENCIA		1.000	0.000	10.5	10.4	1.000	0.3		
1243 BAURU		0.00	0.00	-87.71	-88.38	0.00	-53.51		
O REFERENCIA		0.758	0.043	641.9	43.5	0.394	749.3		
1251 EMBUGUACU440		-0.04	8.75	-84.53	-72.48	-0.32	-85.30		
O REFERENCIA		0.824	0.007	280.1	10.5	0.561	338.0		
1243 BAURU		-0.06	17.72	-84.92	-63.55	-0.28	-85.63		
O REFERENCIA		0.824	0.007	280.1	10.5	0.561	338.0		
1249 CABREUVA		-0.06	17.72	-84.92	-63.55	-0.28	-85.63		
O REFERENCIA		0.822	0.004	358.1	13.4	0.556	431.5		
1249 CABREUVA		0.05	21.95	-83.80	-68.41	0.10	-84.30		
O REFERENCIA		0.822	0.004	358.1	13.4	0.556	431.5		
1243 BAURU		0.05	21.95	-83.80	-68.41	0.10	-84.30		
O REFERENCIA		0.758	0.043	641.9	43.5	0.394	749.3		
1241 ARARAQUAR440		-0.04	8.75	-84.53	-72.48	-0.32	-85.30		
O REFERENCIA		0.769	0.037	600.9	38.9	0.424	703.5		
1252 SANGALO		0.06	9.44	-84.22	-72.82	0.14	-84.90		
O REFERENCIA		0.830	0.007	264.9	9.3	0.574	320.4		
1241 ARARAQUAR440		-0.00	17.42	-85.49	-62.92	-0.08	-86.19		

\*-LINHA ABERTA: ISOLTEIRA440 - JUPIA 440

BARRA EM ESTUDO: ISOLTEIRA440

Tab. 4.17 Estudo da REDE 5

Linha aberta

\*-----CURTO IF/T-----\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 EO MVA TOTAL  
20778.6 0.592 0.184 16984.4  
-88.71 0.12 0.78 -88.54

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*				*-----CURTO IF/T-----*		*-----CURTO 3F-----*	
CIRC				E1	EO	2I+IO	IO
0	REFERENCIA	1239 ISOLTEIRA440	1	1.000	0.000	15648.3	6586.6
				0.00	0.00	-89.77	-89.22
1293	AUXILIAR	35 1245 JUPIA	440	1	0.950	0.000	83.3
				0.39	11.99	-75.27	-65.70
0	REFERENCIA	1293 AUXILIAR	35	1	1.000	0.000	0.5
				0.00	0.00	-74.62	-78.01
1243	BAURU	440 1239 ISOLTEIRA440	21	0.805	0.037	848.1	40.9
				-0.03	8.65	-84.79	-71.74
1251	EMBUGUACU440	1243 BAURU	440	70	0.853	0.006	203.9
				-0.04	17.67	-84.73	-63.67
1251	EMBUGUACU440	1243 BAURU	440	69	0.805	0.037	203.9
				-0.03	8.65	-84.73	-63.67
1249	CABREUVA	440 1243 BAURU	440	68	0.852	0.004	263.1
				0.03	21.92	-83.69	-68.53
1249	CABREUVA	440 1243 BAURU	440	67	0.805	0.037	263.1
				-0.03	8.65	-83.69	-68.53
1243	BAURU	440 1239 ISOLTEIRA440	20	0.805	0.037	848.1	40.9
				-0.03	8.65	-84.79	-71.74
1241	ARARAQUAR	440 1239 ISOLTEIRA440	19	0.791	0.032	695.9	36.3
				0.05	9.58	-84.54	-72.23
1252	SANGELO	440 1241 ARARAQUAR	440	50	0.854	0.006	275.3
				-0.00	17.48	-85.49	-62.75
1252	SANGELO	440 1241 ARARAQUAR	440	49	0.791	0.032	275.3
				0.05	9.58	-85.49	-62.75

1.000 1111.1  
0.00 -90.00  
0.878 100.7  
1.00 -75.22  
1.000 0.1  
0.00 -52.17  
0.521 991.1  
-0.28 -85.26  
0.639 239.8  
-0.24 -85.50  
0.521 239.8  
-0.28 -85.50  
0.637 309.0  
-0.01 -84.20  
0.521 309.0  
-0.28 -84.20  
0.521 991.1  
-0.28 -85.26  
0.488 809.9  
0.01 -85.03  
0.642 328.4  
-0.11 -85.90  
0.488 328.4  
0.01 -85.90

\*\*CURTO EM FIM DE LINHA: ISOLTEIRA440 - JUPIA 440

BARRA EM ESTUDO: ISOLTEIRA440

Tab. 4.18 Estudo da REDE 5

\*\*\*\*\*CURTO 1F/T\*\*\*\*\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 E0 MVA TOTAL  
4004.8 0.922 0.036 6447.8  
-81.23 -0.62 8.27 -86.86

Curto em fim de linha

MAGNITUDES  
ANGULOS

*****C O N T R I B U I C O E S*****										*****CURTO		1F/T*****		*****		**--CURTO		3F--**	
										E1	E0	2I1+I0	I0	V	MVA				
O REFERENCIA										1.000	0.000	3016.0	1269.5	1.000	4218.1				
1293 AUXILIAR 35 1245 JUPIA 440 1										0.00	0.00	-82.29	-81.73	0.00	-88.32				
										0.990	0.000	16.1	0.2	0.953	38.2				
O REFERENCIA 1293 AUXILIAR 35 1										-0.00	19.47	-67.78	-58.21	0.27	-73.54				
										1.000	0.000	0.1	0.1	1.000	0.0				
										0.00	0.00	-67.13	-70.53	0.00	-50.49				
1243 BAURU 440 1239 ISOLTEIRA440 21										0.963	0.007	163.5	7.9	0.818	376.2				
										-0.30	16.13	-77.30	-64.26	-0.44	-83.58				
1251 EMBUGUACU440 1243 BAURU 440 70										0.972	0.001	39.3	1.7	0.863	91.0				
										-0.22	25.16	-77.25	-56.19	-0.33	-83.82				
1251 EMBUGUACU440 1243 BAURU 440 69										0.963	0.007	39.3	1.7	0.818	91.0				
										-0.30	16.13	-77.25	-56.19	-0.44	-83.82				
1249 CABREUVA 440 1243 BAURU 440 68										0.972	0.001	50.7	2.2	0.862	117.3				
										-0.21	29.41	-76.21	-61.04	-0.27	-82.52				
1249 CABREUVA 440 1243 BAURU 440 67										0.963	0.007	50.7	2.2	0.818	117.3				
										-0.30	16.13	-76.21	-61.04	-0.44	-82.52				
1243 BAURU 440 1239 ISOLTEIRA440 20										0.963	0.007	163.5	7.9	0.818	376.2				
										-0.30	16.13	-77.30	-64.26	-0.44	-83.58				
1241 ARARAQUAR440 1239 ISOLTEIRA440 19										0.960	0.006	134.1	7.0	0.806	307.5				
										-0.31	17.07	-77.05	-64.74	-0.40	-83.35				
1252 SANGELO 440 1241 ARARAQUAR440 50										0.972	0.001	53.1	1.6	0.864	124.7				
										-0.22	24.97	-78.01	-55.26	-0.30	-84.31				
1252 SANGELO 440 1241 ARARAQUAR440 49										0.960	0.006	53.1	1.6	0.806	124.7				
										-0.31	17.07	-78.01	-55.26	-0.40	-84.31				
1257 AUXILIAR 34 1241 ARARAQUAR440 1										0.969	0.003	25.2	3.9	0.851	51.5				
										-0.09	16.39	-69.25	-72.41	0.47	-74.30				

\*\*\*\*\*CASO BASICO\*\*\*\*\*

BARRA EM ESTUDO: BRA-NORTE-33

Tab. 4.19 Estudo da REDE 6  
Condição básica

\*\*\*\*\*CURTO 1F/T\*\*\*\*\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 E0 MVA TOTAL  
941.1 0.554 0.109 703.8  
-86.18 0.21 2.10 -85.92

MAGNITUDES  
ANGULOS

*****CURTO 1F/T*****										*****CURTO 3F*****	
E1 E0 2I1+I0 I0										V MVA	
421 E-SE/04 --06	384 BRA-NORTE-33	28	0.567	0.093	16.1	0.4	0.030	17.6			
424 SE/03 --033	421 E-SE/04 --06	33	-0.15	1.13	-80.53	-111.15	-14.85	-79.44			
420 E-SE/04 --05	384 BRA-NORTE-33	27	0.577	0.075	16.1	0.4	0.054	17.6			
424 SE/03 --033	420 E-SE/04 --05	32	-0.42	1.81	-80.53	-111.15	-14.85	-79.44			
419 E-SE/04 --04	384 BRA-NORTE-33	26	0.567	0.091	16.8	1.1	0.030	17.6			
424 SE/03 --033	419 E-SE/04 --04	31	-0.15	0.83	-78.42	-60.65	-14.85	-79.44			
418 E-SE/04 --03	384 BRA-NORTE-33	25	0.577	0.075	16.8	1.1	0.054	17.6			
423 P-SE/04 --033	418 E-SE/04 --03	30	-0.42	1.81	-78.42	-60.65	-14.85	-79.44			
417 E-SE/04 --02	384 BRA-NORTE-33	24	0.572	0.085	24.0	2.4	0.042	24.5			
416 E-SE/04 --01	384 BRA-NORTE-33	23	-0.44	0.28	-81.49	-53.20	-19.63	-84.22			
422 SE/04 --033	416 E-SE/04 --01	29	0.573	0.080	24.0	2.4	0.045	24.5			
411 SE/08---	33	384 BRA-NORTE-33	18	-0.48	0.05	-81.49	-53.20	-19.62	-84.22		
411 SE/08---	33	384 BRA-NORTE-33	17	0.554	0.097	0.0	0.0	0.000	0.0		
				0.21	2.72	104.59	-59.61	168.79	104.21		
				0.554	0.098	0.0	0.0	0.000	0.0		
				0.21	2.55	-63.59	-107.10	1.18	-63.41		
				0.554	0.088	0.0	0.0	0.000	0.0		
				0.21	1.89	-67.36	-11.43	1.13	-67.74		
				0.554	0.109	0.0	0.0	0.000	0.0		
				0.21	2.10	103.09	-72.54	90.00	28.40		
				0.554	0.109	0.0	0.0	0.000	0.0		
				0.21	2.10	103.09	-72.54	90.00	28.90		

\*-LINHA ABERTA: BRA-NORTE-33 - E-SE/04 --06

BARRA EM ESTUDO: BRA-NORTE-33

Tab. 4.20 Estudo da REDE 6

Linha aberta

\*-----CURTO IF/T-----\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 E0 NVA TOTAL  
939.6 0.554 0.108 702.5  
-86.16 0.21 2.11 -85.91

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*				*-----CURTO		IF/T-----*		*--CURTO		3F--*	
				E1	E0	2I1+I0	I0	V	NVA		
424 SE/03	-033	421 E-SE/04	--06 33	0.585	0.075	0.0	0.0	0.072	0.0	0.0	0.0
				-0.59	2.14	-168.02	61.37	-14.32	-150.48		
420 E-SE/04	--05	384 BRA-NORTE-33	27	0.572	0.090	22.2	1.3	0.040	23.5		
				-0.25	1.59	-78.51	-67.43	-14.32	-78.91		
424 SE/03	-033	420 E-SE/04	--05 32	0.585	0.075	22.2	1.3	0.072	23.5		
				-0.59	2.14	-78.51	-67.43	-14.32	-78.91		
419 E-SE/04	-04	384 BRA-NORTE-33	26	0.572	0.101	22.0	1.0	0.040	23.5		
				-0.25	2.49	-78.87	-72.80	-14.32	-78.91		
424 SE/03	-033	419 E-SE/04	--04 31	0.585	0.075	22.0	1.0	0.072	23.5		
				-0.59	2.14	-78.87	-72.80	-14.32	-78.91		
418 E-SE/04	--03	384 BRA-NORTE-33	25	0.575	0.086	28.1	2.5	0.050	29.0		
				-0.53	-0.26	-81.48	-54.84	-19.13	-83.72		
423 E-SE/04	-033	418 E-SE/04	--03 30	0.577	0.080	28.1	2.5	0.053	29.0		
				-0.58	-0.14	-81.48	-54.84	-19.12	-83.72		
417 E-SE/04	--07	384 BRA-NORTE-33	24	0.554	0.098	0.0	0.0	0.000	0.0		
				0.21	2.66	95.17	-64.65	171.03	98.95		
416 E-SE/04	--01	384 BRA-NORTE-33	23	0.554	0.098	0.0	0.0	0.000	0.0		
				0.21	2.54	-63.46	-75.33	1.29	-63.18		
422 SE/04	-033	416 E-SE/04	--01 29	0.554	0.088	0.0	0.0	0.000	0.0		
				0.21	2.03	-67.23	-5.25	1.13	-67.73		
411 SE/08	---	384 BRA-NORTE-33	18	0.554	0.108	0.0	0.0	0.000	0.0		



\*\*\*\*\*CASO BASICO\*\*\*\*\*

BARRA EM ESTUDO: CASCADURA138

*****CURTO IF/T*****		*CURTO 3F*	
MVA TOTAL	E1 E0	MVA TOTAL	
4870.9	0.703 0.409	5424.7	
-80.44	-2.48 -8.57	-86.28	

Tab. 4.22 Estudo da REDE 7  
Condição básica

MAGNITUDES  
ANGULOS

*****CONTRIBUIÇÔES*****										*CURTO 3F*	
CIRC										V	MVA
E1 E0 IF/T 211+T0 IO											
915 FICTICIO	67	863 CASCADURA138	21	0.719	0.286	714.9	283.0	0.054	721.6		
				-2.51	-7.39	-83.16	-82.74	-9.38	-89.28		
890 FICTICIO	45	915 FICTICIO	67	0.719	0.286	264.9	189.3	0.054	128.9		
				-2.51	-7.39	-91.05	-87.17	-9.40	-106.44		
78 JACAREP	138	915 FICTICIO	67	0.767	0.093	453.9	95.4	0.214	599.7		
				-2.33	6.84	-78.57	-73.92	-6.49	-85.65		
914 FICTICIO	66	863 CASCADURA138	20	0.719	0.288	704.0	272.0	0.054	721.6		
				-2.51	-7.32	-83.25	-82.96	-9.38	-89.28		
889 FICTICIO	44	914 FICTICIO	66	0.719	0.288	274.7	199.2	0.054	128.9		
				-2.51	-7.33	-90.64	-86.80	-9.40	-106.44		
78 JACAREP	138	914 FICTICIO	66	0.767	0.093	433.0	74.5	0.214	599.7		
				-2.33	6.84	-78.57	-72.64	-6.49	-85.65		
892 FICTICIO	47	863 CASCADURA138	19	0.706	0.352	344.5	170.5	0.011	290.8		
				-2.49	-7.62	-74.18	-75.43	-9.18	-78.81		
893 T GRAJAU	138	892 FICTICIO	47	0.725	0.112	344.5	170.5	0.076	290.8		
				-2.68	7.39	-74.18	-75.43	-14.49	-78.81		
891 FICTICIO	46	863 CASCADURA138	18	0.706	0.356	319.3	145.3	0.011	290.8		
				-2.49	-7.55	-74.56	-76.46	-9.18	-78.81		
893 T GRAJAU	138	891 FICTICIO	46	0.725	0.112	319.3	145.3	0.076	290.8		
				-2.68	7.39	-74.56	-76.46	-14.49	-78.81		
884 FICTICIO	39	863 CASCADURA138	17	0.707	0.378	845.7	292.7	0.012	923.9		
				-2.50	-7.71	-82.35	-82.69	-11.00	-88.01		
78 JACAREP	138	884 FICTICIO	39	0.767	0.093	526.3	149.4	0.214	629.6		
				-2.33	6.84	-81.17	-82.40	-6.49	-86.52		
893 T GRAJAU	138	884 FICTICIO	39	0.725	0.112	319.7	143.2	0.076	295.0		
				-2.68	7.39	-84.30	-83.00	-14.49	-91.19		

\*--LINHA ABERTA: CASCADURA138 - FICTICIO 47

HARRA EM ESTUDO: CASCADURA138

Tab. 4.23 Estudo da REDE 7

\*-----CURTO IF/T-----\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 EO MVA TOTAL  
4815.4 0.705 0.413 5399.1  
-80.44 -2.45 -8.39 -86.26

Linha aberta

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*				*-----CURTO		1F/T-----*		*--CURTO		3F--*	
				E1	EO	211+10	IO	V		MVA	
CIRC											
915 FICTICIO	67	863 CASCADURA138	21	0.722	0.288	747.2	289.8	0.057		769.2	
				-2.46	-7.28	-82.72	-82.24	-8.93		-88.83	
890 FICTICIO	45	915 FICTICIO	35	0.722	0.288	299.9	195.1	0.057		177.2	
				-2.46	-7.28	-88.97	-86.42	-8.93		-99.51	
78 JACAREP	138	915 FICTICIO	31	0.769	0.094	450.3	96.3	0.217		596.0	
				-2.30	6.94	-78.56	-73.75	-6.45		-85.68	
914 FICTICIO	66	863 CASCADURA138	20	0.722	0.290	735.0	277.7	0.057		769.2	
				-2.46	-7.24	-82.89	-82.67	-8.93		-88.83	
889 FICTICIO	44	914 FICTICIO	34	0.722	0.290	309.0	204.3	0.057		177.2	
				-2.46	-7.25	-88.80	-86.27	-8.93		-99.51	
78 JACAREP	138	914 FICTICIO	30	0.769	0.094	428.8	74.9	0.217		596.0	
				-2.30	6.94	-78.63	-72.79	-6.45		-85.68	
893 T GRAJAU	138	892 FICTICIO	27	0.731	0.109	0.0	0.0	0.088		0.0	
				-2.61	7.25	105.60	114.94	-12.70		93.74	
891 FICTICIO	46	863 CASCADURA138	18	0.709	0.345	433.0	231.6	0.013		338.9	
				-2.44	-7.60	-72.47	-73.57	-7.39		-77.02	
893 T GRAJAU	138	891 FICTICIO	26	0.731	0.109	433.0	231.6	0.088		338.9	
				-2.61	7.25	-72.47	-73.57	-12.70		-77.02	
884 FICTICIO	39	863 CASCADURA138	17	0.709	0.381	906.1	321.0	0.013		984.2	
				-2.46	-7.53	-82.15	-83.12	-10.42		-87.43	
78 JACAREP	138	884 FICTICIO	28	0.769	0.094	528.3	150.8	0.217		635.1	
				-2.30	6.94	-81.09	-82.13	-6.45		-86.49	
893 T GRAJAU	138	884 FICTICIO	23	0.731	0.109	377.9	170.2	0.088		349.3	
				-2.61	7.25	-83.62	-84.00	-12.70		-89.12	
883 FICTICIO	38	863 CASCADURA138	16	0.709	0.382	922.3	337.2	0.013		984.2	
				-2.46	-7.57	-82.09	-82.91	-10.42		-87.43	



\*-CURTO EM FIM DE LINHA: CASCADURA138 - FICTICIO 47

Tab. 4.24 Estudo da REDE 7

BARRA EM ESTUDO: CASCADURA138

Curto em fim de linha

\*-----CURTO IF/T-----\* \*CURTO 3F\*  
MVA TOTAL E1 E0 MVA TOTAL  
3453.8 0.790 0.278 4519.8  
-77.12 -2.46 -4.17 -83.49

MAGNITUDES  
ANGULOS

*-----C O N T R I B U I C O E S-----*				*-----CURTO		IF/T-----*		*--CURTO		3F--*	
				E1	E0	211+10	I0	V		MVA	
CIRC											
915 FICTICIO	67	863 CASCADURA138	21	0.802	0.208	542.2	214.2	0.216		644.0	
				-2.42	-3.94	-79.11	-78.22	-12.17		-86.06	
890 FICTICIO	45	915 FICTICIO	35	0.802	0.208	218.6	143.5	0.216		148.3	
				-2.42	-3.95	-85.15	-82.40	-12.16		-96.74	
78 JACAREP	138	915 FICTICIO	31	0.836	0.068	325.7	71.9	0.349		499.0	
				-2.17	10.16	-75.07	-69.85	-8.59		-82.91	
914 FICTICIO	66	863 CASCADURA138	20	0.802	0.209	523.9	195.9	0.216		644.0	
				-2.42	-4.17	-80.04	-80.61	-12.17		-86.06	
889 FICTICIO	44	914 FICTICIO	34	0.802	0.209	219.4	144.2	0.216		148.3	
				-2.42	-4.18	-86.28	-84.14	-12.16		-96.74	
78 JACAREP	138	914 FICTICIO	30	0.836	0.068	306.7	52.7	0.349		499.0	
				-2.17	10.16	-75.57	-70.90	-8.59		-82.91	
893 T GRAJAU	138	892 FICTICIO	27	0.809	0.079	0.0	0.0	0.243		0.0	
				-2.48	10.58	108.37	116.92	-12.66		96.51	
891 FICTICIO	46	863 CASCADURA138	18	0.793	0.253	324.9	180.4	0.179		283.7	
				-2.44	-3.95	-68.89	-69.69	-13.32		-74.25	
893 T GRAJAU	138	891 FICTICIO	26	0.809	0.079	324.9	180.4	0.243		283.7	
				-2.48	10.58	-68.89	-69.69	-12.66		-74.25	
884 FICTICIO	39	863 CASCADURA138	17	0.793	0.274	647.4	227.8	0.180		823.9	
				-2.45	-4.31	-78.90	-80.03	-13.48		-84.66	
78 JACAREP	138	884 FICTICIO	28	0.836	0.068	379.9	109.0	0.349		531.6	
				-2.17	10.16	-77.77	-78.79	-8.59		-83.73	
893 T GRAJAU	138	884 FICTICIO	23	0.809	0.079	267.7	118.8	0.243		292.5	
				-2.48	10.58	-80.51	-81.16	-12.66		-86.35	
883 FICTICIO	38	863 CASCADURA138	16	0.793	0.273	654.0	234.3	0.180		823.9	
				-2.45	-4.42	-78.92	-80.04	-13.48		-84.66	

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Foram desenvolvidos e testados em vários sistemas reais dois tipos de programas para o cálculo de curto-circuito em sistemas com grandes dimensões. A primeira versão utiliza o método da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa e a segunda o método da matriz  $Y_{\text{BARRA}}$ -fatorada.

A utilização de técnicas de esparsidade introduz nos programas de curto-circuito as mesmas vantagens já conhecidas de outras aplicações como por exemplo o cálculo de fluxo de carga e de estabilidade transitória.

O método da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$ -esparsa tem um desempenho excelente em uma gama limitada de problemas, ou seja, análise de curto-circuito trifásico quando é suficiente o conhecimento das contribuições de primeira vizinhança. Nos casos em que é importante o conhecimento das contribuições de vizinhanças de ordem superior ou então deve ser levado em conta o efeito das indutâncias mútuas nos circuitos de sequência zero, a melhor solução está na utilização do método da matriz  $Y_{\text{BARRA}}$ -fatorada.

Em ambas as versões foi utilizado o método de bi-fatoração de matrizes esparsas.

Considerando-se itens como armazenamento, tempo de computação e flexibilidade de programação, os métodos apresentados neste trabalho levam grande vantagem quando comparados com os métodos normalmente utilizados nos programas convencionais.

As maiores dificuldades de programação estão associados no tratamento de grupos com um grande número de linhas mutuamente acopladas, como é comum na região sudeste do Brasil.

Decorrente do crescimento do sistema interligado, principalmente com o aumento de níveis de tensão, será necessária a

introdução de melhorias na modelagem das rede., levando-se em conta os seguintes aspectos:

- representação de elementos paralelos (cargas, capacitância de linhas, reatores e capacitores) |40|;
- representação de transformadores para derivações fora da derivação nominal;
- determinação dos valores das magnitudes e ângulos das tensões internas das máquinas síncronas na operação normal mediante o caso básico de fluxo de carga;
- representação da rede de seqüência negativa.

O outro item que deverá ser implementado é a utilização de circuitos equivalente externos. A introdução desta melhoria é grandemente facilitada pelo fato de se utilizar um método baseado na formação da matriz  $Y_{\text{BARRA}}$ .

Alguns resultados obtidos através dos programas desenvolvidos neste trabalho já foram utilizados para ajustes de relés do sistema CPFL.

APÊNDICE A

TRANSFORMAÇÕES DE COMPONENTES SIMÉTRICAS  
NA ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO

A.1. Propriedades das transformações de componentes simétricas

Os circuitos dos elementos passivos que compõem um sistema de potência, nas condições desequilibradas, podem ser descritos pela equação

$$\underline{V}_p = Z_c \underline{I}_p \quad (A.1)$$

onde

$$\underline{V}_p = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad \text{vetor tensão}$$

$$\underline{I}_p = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad \text{vetor corrente}$$

$Z_c$  - matriz cheia 3x3, do circuito

Aplicando a TCS nos vetores da equação (A.1) vem:

$$T \underline{V}_S = Z_C T \underline{I}_S \quad (A.2)$$

Multiplicando a equação (A.2) por  $T^{-1}$  tem-se:

$$T^{-1} T \underline{V}_S = T^{-1} Z_C T \underline{I}_S \quad (A.3)$$

ou

$$\underline{V}_S = Z_S \underline{I}_S \quad (A.4)$$

definindo-se

$$Z_S = T^{-1} Z_C T \quad (A.5)$$

onde  $Z_S$  é uma matriz diagonal, em que seus elementos são as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero. Sendo diagonal não haverá acoplamento entre os circuitos das três seqüências, o que possibilita serem tratados separadamente.

Em um sistema nas condições desequilibradas, a equação que descreve o funcionamento de um elemento ativo é dada por

$$\underline{E}_P = \underline{E}_P^G - Z_C \underline{I}_P \quad (A.6)$$

onde

$$\underline{E}_P = \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad \text{vetor tensão terminal}$$

$$\underline{E}_P^G = \begin{bmatrix} E_A^G \\ E_B^G \\ E_C^G \end{bmatrix} \quad \text{vetor f.e.m.}$$

$$\underline{I}_P = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad \text{vetor corrente}$$

$Z_C$  - matriz cheia 3x3, do circuito

Aplicando a TCS nos vetores  $\underline{E}_P$  e  $\underline{I}_P$  da equação (A.6) vem:

$$T \underline{E}_S = \underline{E}_P^G - Z_C T \underline{I}_S \quad (A.7)$$

Multiplicando ambos os membros da equação (A.7) por  $T^{-1}$  tem-se:

$$T^{-1} T \underline{E}_S = T^{-1} \underline{E}_P^G - T^{-1} Z_C T \underline{I}_S \quad (A.8)$$

ou

$$\underline{E}_S = T^{-1} \underline{E}_P^G - Z_S \underline{I}_S \quad (A.9)$$

definindo-se

$$Z_S = T^{-1} Z_C T \quad (A.10)$$

Também neste caso, a matriz  $Z_s$  é diagonal, o que significa desacoplamento entre os circuitos de seqüências.

É importante salientar que numa máquina síncrona, mesmo nas condições subtransitórias produzidas por um curto-circuito desequilibrado, as f.e.m. geradas  $\underline{E}_p^G$  podem ser consideradas equilibradas. Assim sendo,

$$\underline{E}_p^G = \begin{bmatrix} E_A^G \\ E_B^G \\ E_C^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A^G \\ a^2 E_A^G \\ a E_A^G \end{bmatrix} \quad (A.11)$$

logo

$$\underline{T}^{-1} \underline{E}_p^G = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A^G \\ a^2 E_A^G \\ a E_A^G \end{bmatrix} \quad (A.12)$$

ou

$$\underline{E}_s^G = \begin{bmatrix} E_A^G(1 + a^3 + a^3) \\ E_A^G(1 + a^4 + a^2) \\ E_A^G(1 + a^2 + a) \end{bmatrix} \quad (A.13)$$

portanto,

$$\begin{bmatrix} E_+^G \\ E_-^G \\ E_0^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A^G \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.14)$$

concluindo-se que não existem f.e.m. de seqüência negativa e de seqüência zero.

#### A.2. Conexão das redes de seqüências para simulação de curto-circuito

Para que seja possível a análise de curto-circuito numa rede de um sistema de potência ela deve passar pelas seguintes fases:

1. obtenção das impedâncias de seqüência positiva, negativa e zero (parâmetros) dos elementos componentes da rede;
2. obtenção das redes de seqüência positiva, negativa e zero;
3. conexão das redes de seqüências, de acordo com o tipo de curto-circuito a ser analisado (trifásico, monofásico, bifásico, bifásico à terra etc).

A obtenção dos parâmetros dos elementos da rede (fase 1) pode ser feita analiticamente ou por meio de testes.

Conhecendo-se a configuração original do sistema, as redes de seqüências são obtidas (fase 2) interligando-se todos os parâmetros de uma mesma seqüência. Considera-se normalmente, a rede de seqüência negativa idêntica à de seqüência positiva.

Tendo-se as redes de seqüências pode-se simular qualquer tipo de curto-circuito, ligando-as convenientemente (fase 3).



Neste trabalho, serão analisados o curto-circuito trifásico simétrico e curto-circuito monofásico.

No curto-circuito trifásico simétrico, obviamente só a rede de sequência positiva é usada e a sua conexão é ilustrada na Fig. - 3.7 do Cap. - III, para uma falha na barra k.

Considere-se agora, um curto-circuito na fase A da barra k, através de uma impedância de falha  $z_f$ . No ponto de falha tem-se as seguintes condições:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_k \\ I_B &= 0 \\ I_C &= 0 \\ E_A &= z_f I_k \end{aligned} \right\} \quad (A.15)$$

Portanto,

$$\underline{I}_p = \begin{bmatrix} I_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.16)$$

Pela TCS,

$$\underline{I}_s = T^{-1} \underline{I}_p \quad (A.17)$$

ou

$$\begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.18)$$

logo,

$$\begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_k \\ I_k \\ I_k \end{bmatrix} \quad (\text{A.19})$$

e conclui-se que,

$$I_+ = I_- = I_0 = \frac{1}{3} I_k \quad (\text{A.20})$$

As componentes simétricas das tensões, no ponto de falha podem ser descritas pela equação

$$\underline{E}_s = \underline{E}_s^G - \underline{z}_s \underline{I}_s \quad (\text{A.21})$$

ou

$$\begin{bmatrix} E_{+k} \\ E_{-k} \\ E_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A^G \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{kk}^+ & 0 & 0 \\ 0 & z_{kk}^- & 0 \\ 0 & 0 & z_{kk}^0 \end{bmatrix} \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_k \\ I_k \\ I_k \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

No ponto de falha tem-se:

$$E_A = z_f I_k = E_{+k} + E_{-k} + E_{0k} \quad (\text{A.23})$$

Das equações (A.22) e (A.23) vem:

$$z_f I_k = (E_A^G - \frac{1}{3} z_{kk}^+ I_k) + (-\frac{1}{3} z_{kk}^- I_k) + (-\frac{1}{3} z_{kk}^0 I_k)$$

$$3E_A^G = I_k (z_{kk}^+ + z_{kk}^- + z_{kk}^0 + 3z_f)$$

$$I_k = \frac{3E_A^G}{z_{kk}^+ + z_{kk}^- + z_{kk}^0 + 3z_f} \quad (A.24)$$

ou

$$I_{+k} = I_{-k} = I_{ok} = \frac{E_A^G}{z_{kk}^+ + z_{kk}^- + z_{kk}^0 + 3z_f} \quad (A.25)$$

Tendo-se

$$E_A^G = 1.0 \text{ pu}$$

$$z_f = 0$$

$$z_{kk}^- = z_{kk}^+$$

vem

$$I_{+k} = I_{-k} = I_{ok} = \frac{1.0}{2 z_{kk}^+ + z_{kk}^0} \quad (A.26)$$

que é a equação que descreve o circuito da Fig. - 3.14 do Cap. - III.

## APÊNDICE B

### MÉTODOS DAS MATRIZES ESPARSAS

#### B.1. Eliminação de Gauss

Dado um sistema de equações algébricas lineares

$$\underline{Ax} = \underline{b} \quad (B.1)$$

o método de eliminação de Gauss consiste em se chegar à solução  $\underline{x}$  através de operações em duas etapas. A primeira etapa ("forward") consiste, mediante combinações lineares das equações do sistema, em zerar os elementos do triângulo inferior da matriz dos coeficientes e normalizar, para 1,0, os elementos da diagonal principal. Esta etapa é conhecida também como triangulização. A etapa seguinte ("backward") consiste em zerar os elementos do triângulo superior. Após estas duas etapas, a matriz dos coeficientes ficará reduzida a uma matriz identidade. As mesmas operações, se forem aplicadas no vetor independente, transformam  $\underline{b}$  no vetor solução  $\underline{x}$ .

#### B.2. Decomposição LDU

O processo de eliminação de Gauss pode ser esquematizado através de operações com matrizes elementares.

Dois tipos de matrizes elementares serão consideradas:

$$T_{ii} = \begin{array}{c} \begin{array}{c} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{array} \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} \vdots \\ 1 \\ \vdots \end{array} \end{array} \quad (B.2)$$

$$T_{ij} = \begin{array}{c} j \\ \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{c} 1 \\ \\ \\ \\ \end{array} \\ \hline \end{array} \end{array} \quad (B.3)$$

Pode-se observar que, somente o elemento  $c$  faz com que essas matrizes sejam diferentes da matriz identidade.

Aplicando-se as matrizes elementares, a eliminação de Gauss pode ser feita da maneira indicada a seguir:

$$I = T_n T_{(n-1)} \dots T_2 T_1 A \quad (B.4)$$

ou

$$\underline{x} = T_n T_{(n-1)} \dots T_2 T_1 \underline{b} \quad (B.5)$$

A equação (B.4) é a representação formal das seguintes operações:

$$\left. \begin{array}{l} A_1 = T_1 A \\ A_2 = T_2 A_1 \\ \dots\dots\dots \\ I = T_n A_{(n-1)} \end{array} \right\} \quad (B.6)$$

Da equação (B.4) tem-se que a matriz inversa  $A^{-1}$  é:

$$A^{-1} = T_n T_{(n-1)} \dots T_2 T_1 \quad (B.7)$$

Invertendo-se ambos os membros da equação (B.7) tem-se:

$$A = T_1^{-1} T_2^{-1} \dots T_{(n-1)}^{-1} T_n^{-1} \quad (B.8)$$

Das matrizes elementares  $T_j^{-1}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), algumas operam no triângulo inferior, outras na diagonal e as restantes no triângulo superior. Denominando-se os produtos de matrizes elementares que operam no triângulo inferior, na diagonal e no triângulo superior respectivamente de  $L$ ,  $D$  e  $U$ , a matriz dos coeficientes pode ser expressada por:

$$A = LDU \quad (B.9)$$

A expressão (B.9) é conhecida como decomposição LDU.

Pode-se obter a decomposição LDU de várias maneiras, dependendo de como se aplica a eliminação. As mais conhecidas são:

1. a eliminação por linha, de um elemento por vez, denominada de decomposição triangular [23];
2. combinando-se a eliminação inferior por coluna e superior por linha, denominada de bi-fatoração [34].

A aplicação da decomposição LDU torna-se vantajosa quando a matriz dos coeficientes é esparsa, pois neste caso usa-se um esquema de armazenamento compacto, em que somente os elementos diferentes de zero são retidos.

Antes de se iniciar a decomposição, realiza-se a ordenação das equações do sistema. A ordenação ótima, seguindo determinados critérios, implica em minimizar o aparecimento de elementos não nulos (fill-in) durante o processo de eliminação, fazendo com que a esparsidade das matrizes  $L$  e  $U$  não seja muito prejudicada, quando comparada à esparsidade da matriz original.

### B.3. Método de bi-fatoração

Este método consiste em se efetuar a eliminação de Gauss, eliminando simultaneamente uma linha e uma coluna da matriz dos coeficientes, operando com matrizes dos tipos dados a seguir:

$$L_j = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & x & 1 & & \\ & & x & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & x & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (B.10)$$

$j$

$$U_j = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & x & \dots & x \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (B.11)$$

$j$

Seja  $Y$  a matriz de admitância nodal. As operações com as matrizes  $L_j$  e  $U_j$  que a tornam numa matriz identidade são:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= L_1 Y U_1 \\ Y_2 &= L_2 Y_1 U_2 \\ &\dots\dots\dots \\ I &= L_n Y_{(n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (B.12)$$

que formalmente podem ser descrita pela equação:

$$L_n L_{(n-1)} \dots L_2 L_1 Y U_1 U_2 \dots U_{(n-1)} = I \quad (B.13)$$

A equação (B.13) pode ser transformada em:

$$Y^{-1} = U_1 U_2 \dots U_{(n-1)} \cdot L_n L_{(n-1)} \dots L_2 L_1 \quad (B.14)$$

e

$$Y = L_1 L_2 \dots L_n L_{(n-1)} U_{(n-1)} \dots U_2 U_1 \quad (B.15)$$

#### B.4. Método da matriz $Z_{\text{BARRA}}$ fatorada

Neste método obtêm-se todos os elementos de uma determinada coluna  $k$  da matriz  $Z_{\text{BARRA}}$  pós-multiplicando-se os fatores esparsos da equação (B.14) por um vetor coluna em que todos os elementos são nulos, exceto o  $k$ -ésimo elemento que é 1. As operações indicadas na equação (B.14) são executadas uma por vez sobre o vetor independente e correspondem às operações contidas nas matrizes elementares  $L_j$  e  $U_j$ .

#### B.5. Método da matriz $Z_{\text{BARRA}}$ esparsa

De acordo com a equação (B.14), a matriz de impedância nodal  $Z$  pode ser obtida por  $2n-1$  multiplicações sucessivas. A matriz  $Z$  assim obtida é também esparsa, mantendo uma estrutura bem próxima da matriz  $Y$ .

A obtenção da matriz  $Z$ -esparsa pode ser formalizada como se segue.

Tendo-se:

$$YZ = I \quad (B.16)$$



e substituindo-se Y pela sua forma fatorada tem-se:

$$LDL^t Z = I \quad (B.17)$$

Mediante operações algébricas na equação (B.17) segue-se:

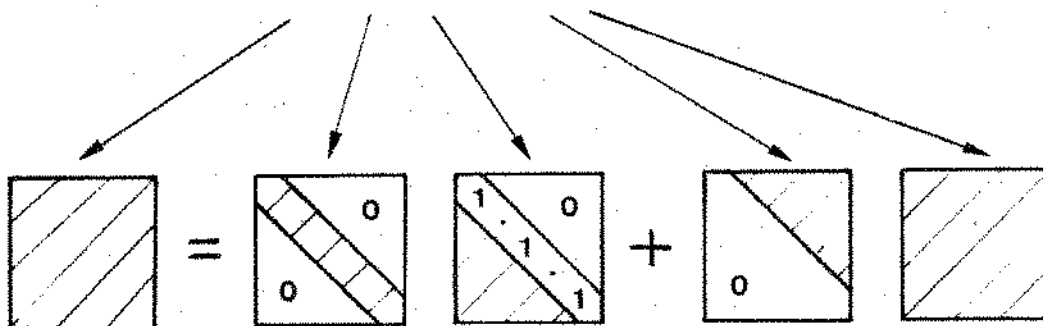
$$\left. \begin{aligned} DL^t Z &= L^{-1} \\ L^t Z &= D^{-1} L^{-1} \\ 0 &= D^{-1} L^{-1} - L^t Z \\ Z &= D^{-1} L^{-1} + Z - L^t Z \\ Z &= D^{-1} L^{-1} + (I - L^t) Z \end{aligned} \right\} \quad (B.18a)$$

e definindo-se

$$(I - L^t) = T \quad (B.18b)$$

finalmente,

$$Z = D^{-1} L^{-1} + T Z \quad (B.18c)$$



As seguintes observações devem ser feitas [43]:

1. L é uma matriz triangular inferior com diagonal unitária. A sua inversa  $L^{-1}$  mantém a mesma estrutura. Portanto, a dia -

gonal da matriz  $D^{-1}L^{-1}$  é igual à da matriz  $D^{-1}$ ;

2. Sendo  $Z$  uma matriz simétrica é suficiente calcular só os elementos do triângulo superior de  $Z_s$ .

Baseadas nestas observações conclui-se que a matriz  $L^{-1}$  não é necessária nos cálculos da matriz esparsa  $Z_s$ . Portanto;

$$Z_s = D^{-1} + T Z \quad (B.19)$$

Pode-se notar que devido a forma peculiar da matriz  $T$ , o cálculo dos elementos da linha  $k$  da  $Z_s$  requer o conhecimento prévio dos elementos das linhas seguintes. Os elementos da  $Z_s$  podem ser calculados sucessivamente, a partir da última linha, obtendo-se somente elementos cujas posições na matriz  $L^t$  são ocupadas por elementos não nulos. O algoritmo que calcula esses elementos, para formar  $Z_s$ , é dado a seguir:

$$Z_{ij} = \sum_k T_{ik} Z_{kj} \quad \text{para } j > i, k < i \quad (B.20)$$

$$Z_{ii} = D_{ii} + \sum_k T_{ik} Z_{ki} \quad \text{para } k > i \quad (B.21)$$

#### B.6. Armazenamento compacto

Quando uma matriz apresenta um alto grau de esparsidade usa-se a técnica de armazenamento compacto, que consiste em armazenar somente os elementos não nulos. O esquema de armazenamento deve possibilitar um fácil acesso aos elementos.

Seja por exemplo uma matriz  $6 \times 6$ , esparsa e simé-

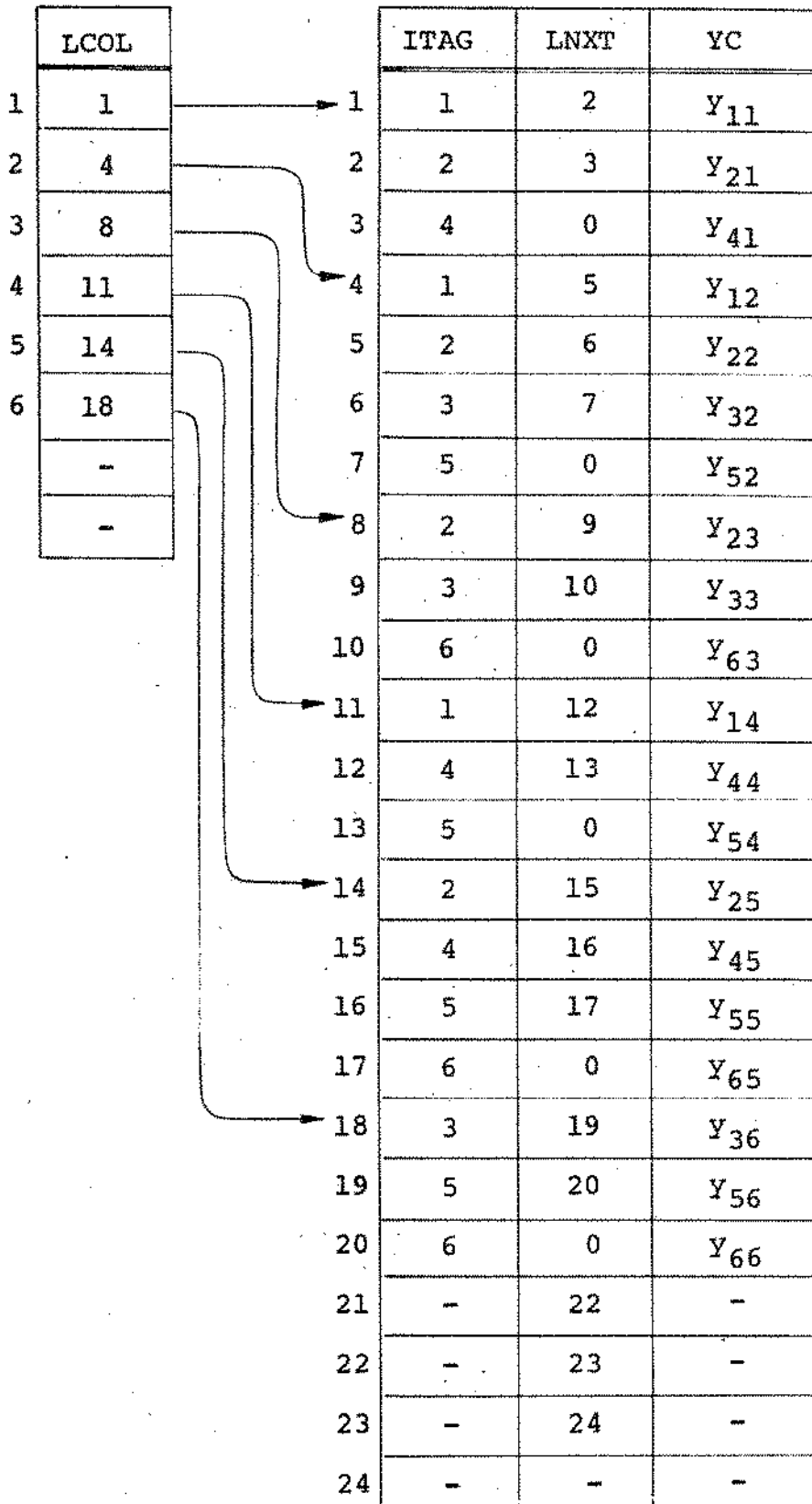
trica, cuja estrutura é dada por |34|:

	1	2	3	4	5	6
1	$Y_{11}$	$Y_{12}$		$Y_{14}$		
2	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$		$Y_{25}$	
3		$Y_{32}$	$Y_{33}$			$Y_{36}$
4	$Y_{41}$			$Y_{44}$	$Y_{45}$	
5		$Y_{52}$		$Y_{54}$	$Y_{55}$	$Y_{56}$
6			$Y_{63}$		$Y_{65}$	$Y_{66}$

Esta matriz pode ser armazenada de forma compacta |34| utilizando-se quatro vetores: três inteiros e um real. O conteúdo de cada um desses vetores é descrito a seguir:

- YC - vetor que contém os elementos não nulos da matriz Y, armazenados por coluna;
- LCOL - vetor auxiliar que indica o início de nova coluna no vetor YC;
- LNXT - vetor auxiliar que indica o encadeamento dos elementos no vetor YC;
- ITAG - vetor auxiliar que indica a que linha de Y pertence o elemento do vetor YC.

O esquema de armazenamento compacto da matriz Y é dado a seguir:



A decomposição  $LDL^t$  é executada sobre o vetor CE com o auxílio dos vetores auxiliares, sendo que a matriz L também é armazenada compactamente.

## APÊNDICE C

### FORMAÇÃO DE CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM GRUPO DE LINHAS ACOPLADAS PELO MÉTODO DE TRANSFORMAÇÃO SINGULAR

#### C.1. Formulação geral

Sendo a impedância mútua um parâmetro entre ramos, não há um modo de incluí-la diretamente na matriz de admitância nodal  $\underline{Y}_{\text{BARRA}}$ .

No Cap. - III foi visto a obtenção de circuito equivalente pelo método de compensação.

Neste Apêndice, este mesmo assunto tem um outro tratamento. Os parâmetros do circuito equivalente são obtidos por meio de transformação de variáveis de ramo (variáveis da rede primitiva) em variáveis nodais.

Seja um grupo de linhas mutuamente acopladas descrito pela equação nodal

$$\underline{Y} \underline{E} = \underline{I} \quad (\text{C.1})$$

sendo

$\underline{Y}$  - matriz de admitância nodal;

$\underline{E}$  - vetor tensão nodal;

$\underline{I}$  - vetor corrente nodal.

A equação que descreve a rede primitiva é:

$$\underline{V} = \underline{Z}_{\text{pri}} \underline{I}_r \quad (\text{C.2})$$

sendo

$\underline{V}$  - vetor das quedas de tensão nos ramos;

$\underline{Z}_{pri}$  - matriz de impedância dos elementos da rede;

$\underline{I}_r$  - vetor das correntes nos ramos.

No que segue, partindo-se da equação (C.2), obtém-se uma equação do tipo (C.1), utilizando-se transformação singular.

A relação existente entre as tensões nos ramos e as tensões nodais é dada por:

$$\underline{V} = A \underline{E} \quad (C.3)$$

e para as correntes é:

$$\underline{I} = A^t \underline{I}_r \quad (C.4)$$

sendo

A - matriz de incidência

Pelas equações (C.2) e (C.3) tem-se:

$$A \underline{E} = \underline{Z}_{pri} \underline{I}_r \quad (C.5)$$

ou

$$\underline{Z}_{pri}^{-1} A \underline{E} = \underline{I}_r \quad (C.6)$$

Multiplicando ambos os membros da equação (C.6) por  $A^t$  vem:

$$A^t Z_{pri}^{-1} A \underline{E} = A^t \underline{I}_r \quad (C.7)$$

ou

$$(A^t Z_{pri}^{-1} A) \underline{E} = \underline{I} \quad (C.8)$$

Portanto,

$$A^t Z_{pri}^{-1} A = Y \quad (C.9)$$

ou

$$A^t Y_{pri} A = Y \quad (C.10)$$

Note-se que a formulação é geral, isto é, várias linhas podem compor um grupo de linhas mutuamente acoplado.

## C.2. Exemplo

É ilustrado o caso mais simples, dado na Fig. - C.1.

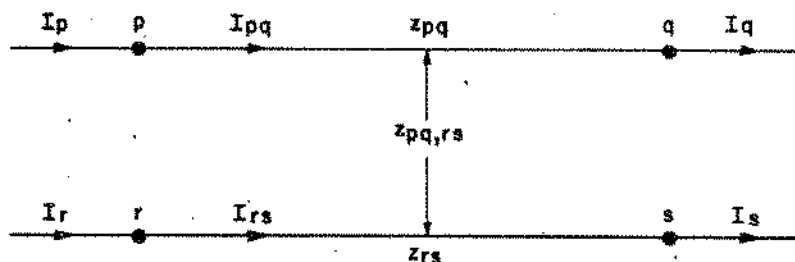


Fig. C.1 Linhas com acoplamento mútuo.



As variáveis da rede primitiva estão relacionadas pela matriz  $Z_{pri}$ , conforme a equação (C.2). Na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{pq} \\ V_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{pq} & z_{pq,rs} \\ z_{pq,rs} & z_{rs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{rs} \end{bmatrix} \quad (C.11)$$

As quedas de tensão nos ramos em função das tensões nodais são:

$$V_{pq} = E_p - E_q$$

$$V_{rs} = E_r - E_s$$

ou na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{pq} \\ V_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \\ E_r \\ E_s \end{bmatrix} \quad (C.12)$$

As correntes nodais em função das correntes nos ramos são:

$$I_p = I_{pq}$$

$$I_q = -I_{pq}$$

$$I_r = I_{rs}$$

$$I_s = -I_{rs}$$

ou na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \\ I_r \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{rs} \end{bmatrix} \quad (C.13)$$

Portanto, neste exemplo a matriz de incidência A é:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Utilizando-se a relação (C.10) obtém-se:

$$\begin{bmatrix} y_{pq} & -y_{pq} & y_{pq,rs} & -y_{pq,rs} \\ -y_{pq} & y_{pq} & -y_{pq,rs} & y_{pq,rs} \\ y_{pq,rs} & -y_{pq,rs} & y_{rs} & -y_{rs} \\ -y_{pq,rs} & y_{pq,rs} & -y_{rs} & y_{rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \\ E_r \\ E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p \\ I_q \\ I_r \\ I_s \end{bmatrix} \quad (C.14)$$

O circuito que descreve a matriz de admitância nodal da equação (C.14) é dada pela Fig. - C.2.

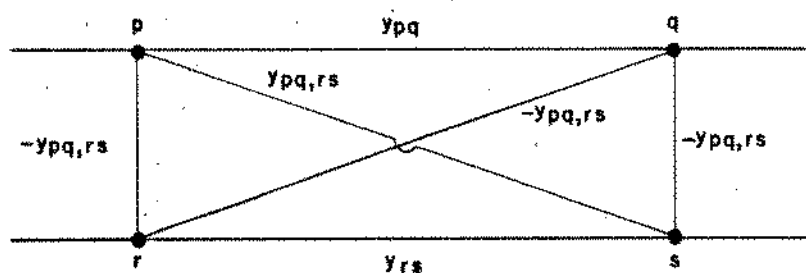


Fig. C.2 Circuito equivalente.

- 126 -  
APÊNDICE D

ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS NO ESTUDO  
DE CURTO-CIRCUITO

D.1. Abertura de uma linha sem acoplamento mútuo

Seja um sistema descrito por:

$$\underline{I} = \underline{Y}\underline{E} \quad (D.1)$$

Qualquer modificação na impedância de um ramo provoca uma variação na matriz de admitância nodal que passa a ser:

$$\underline{Y}' = \underline{Y} + \Delta \underline{Y}' \quad (D.2)$$

Seja a retirada de uma linha cujos nós terminais são  $r$  e  $s$ , de admitância  $y_{rs}$ . A variação  $\Delta \underline{Y}'$  pode ser escrita sob a forma:

$$\Delta \underline{Y}' = -y_{rs} \underline{v} \underline{v}^t \quad (D.3)$$

onde

$$\underline{v}^t = \begin{bmatrix} 0 & \dots & +1 & \dots & -1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (D.4)$$

$r \qquad \qquad \qquad s$

Portanto,

$$\underline{Y}' = \underline{Y} + (-y_{rs} \underline{v} \underline{v}^t) \quad (D.5)$$

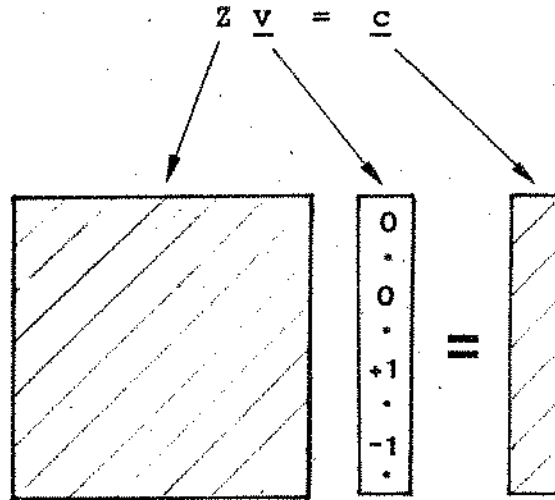
Aplicando-se a fórmula de Woodbury em (D.5) vem:

$$(\underline{Y}')^{-1} = \underline{Y}^{-1} - \frac{(\underline{Y}^{-1} \underline{v}) (\underline{v}^t \underline{Y}^{-1})}{- \frac{1}{y_{rs}} + \underline{v}^t \underline{Y}^{-1} \underline{v}} \quad (D.6)$$

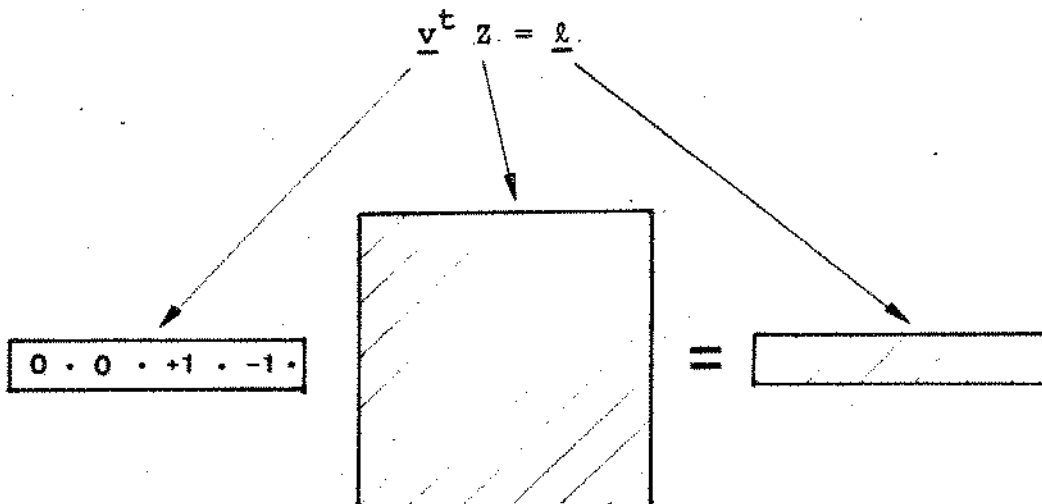
ou

$$\underline{z}' = \underline{z} - \frac{(\underline{z} \underline{v}) (\underline{v}^t \underline{z})}{-\underline{z}_{rs} + \underline{v}^t \underline{z} \underline{v}} \quad (\text{D.7})$$

onde

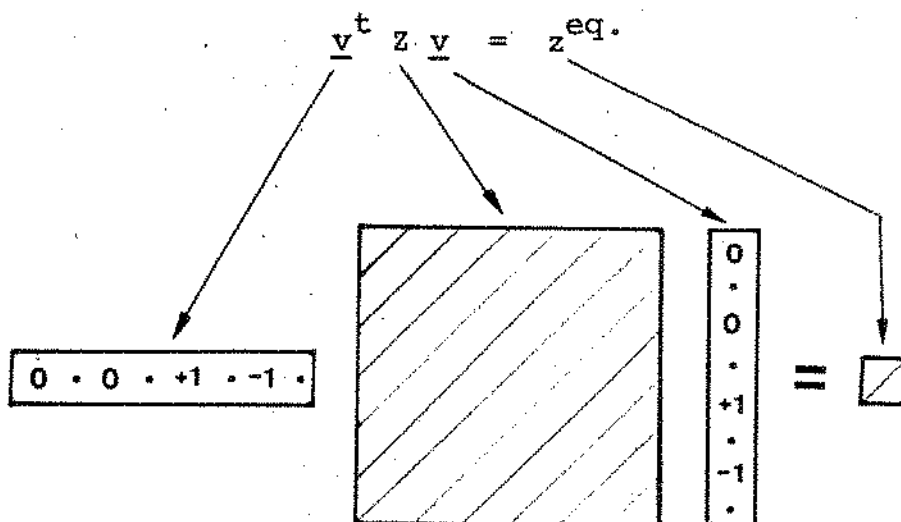
$$\underline{z} \underline{v} = \underline{c}$$


$$\underline{c} = \begin{bmatrix} z_{lr} - z_{ls} \\ \vdots \\ z_{rr} - z_{rs} \\ \vdots \\ z_{sr} - z_{ss} \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ s \end{matrix} \quad (\text{D.8})$$

$$\underline{v}^t \underline{z} = \underline{\ell}$$


$$\underline{\ell} = \begin{bmatrix} (z_{r1} - z_{s1}) & \dots & (z_{rr} - z_{rs}) & \dots & (z_{rs} - z_{ss}) & \dots \end{bmatrix} \quad (D.9)$$

rs



$$z^{eq.} = (z_{rr} - z_{sr}) - (z_{rs} - z_{ss}) \quad (D.10)$$

Portanto,

$$z' = z - \frac{c \underline{\ell}}{z^{eq.} - z_{rs}} \quad (D.11)$$

Para recalcular o elemento  $ij$  da nova matriz o algoritmo será:

$$z'_{ij} = z_{ij} - \frac{(z_{ir} - z_{is})(z_{rj} - z_{sj})}{z_{rr} + z_{ss} - 2z_{rs} - z_{rs}} \quad (D.12)$$

## D.2. Abertura de uma linha com acoplamento mútuo

Na análise da condição linha-aberta de uma linha com acoplamento mútuo o algoritmo (D.12) não é aplicável diretamente. Ele é modificado introduzindo-se um artifício, como se rá mostrado a seguir.

Seja um sistema com  $n$  barras, em que existe um grupo de  $l$  linhas mutuamente acopladas (Fig. D.1).

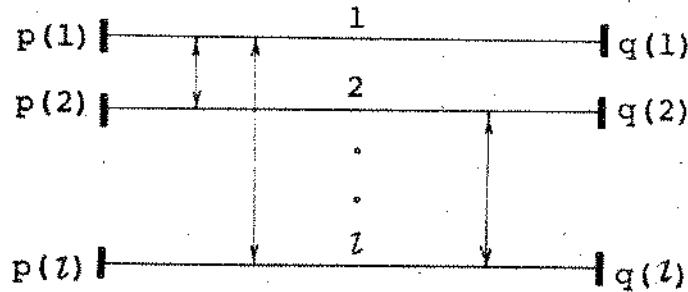


Fig. D.1 Grupo de linhas acopladas

A condição linha-aberta de uma determinada linha do grupo,  $l$  por exemplo, é preparada aplicando-se o seguinte artifício: à linha  $p(l) - q(l)$  são acrescentadas dois ramos,  $r - s$  e  $s - q(l)$ , sem acoplamentos mútuos, cujas impedâncias são respectivamente  $x$  e  $-x$  (Fig. D.2).

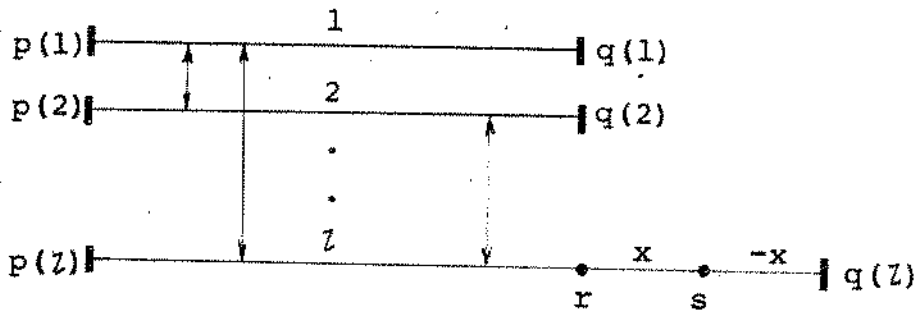


Fig. D.2 Inclusão de duas linhas sem mútuas no grupo

A abertura da linha  $l$  é simulada abrindo-se o ramo  $r - s$ , e como ele não tem acoplamento mútuo pode-se aplicar o algoritmo (D.12). Obviamente, no algoritmo final não deve aparecer nenhum termo relacionado com barras fictícias  $r$  e  $s$ .

A inclusão de  $r$  e  $s$  aumenta a matriz nodal  $Z$  de 2

(duas) linhas e 2 (duas) colunas, como é ilustrado a seguir:

$$Z^{aum.} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & \dots & n & r & s \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ n \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & \cdot & \cdot \\ & Z & & Z_{ir} & Z_{is} \\ & & & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (D.13)$$

$$\begin{matrix} r \\ s \end{matrix} \begin{bmatrix} \cdot & Z_{ri} & \cdot & Z_{rr} & Z_{rs} \\ \cdot & Z_{si} & \cdot & Z_{sr} & Z_{ss} \end{bmatrix}$$

Antes de se iniciar as deduções dos novos elementos de  $Z^{aum.}$ , deve-se ressaltar que a injeção de uma corrente de 1,0 pu numa barra  $k$  equivale a efetuar a operação  $Z\underline{I} = \underline{E}$ , em que todos os elementos do vetor independente são nulos, exceto o  $k$ -ésimo elemento, que é igual a 1. Isto posto, é óbvio que:

$$Z_{ik} = E_{i,k} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (D.14)$$

onde

$Z_{ik}$  - elemento  $(i,k)$  da matriz nodal;

$E_{i,k}$  - tensão nodal na barra  $i$ , quando se aplica uma corrente de 1,0 pu na barra  $k$ .

Outro fato que deve ser lembrado é que o fluxo de corrente de sequência zero em qualquer linha do grupo de mútuas é dado pela equação

$$I_{p(\ell)q(\ell)} = Y_{\ell} \underline{V} \quad (D.15)$$



em que o vetor  $\underline{V}$  pode ser colocado na forma:

$$\underline{V} = I_k \begin{bmatrix} z_{p(1)k} - z_{q(1)k} \\ \vdots \\ z_{p(l)k} - z_{q(l)k} \end{bmatrix} \quad (D.16)$$

onde  $I_k$  é a corrente injetada na barra  $k$ .

No caso de  $I_k = 1,0$  pu,

$$\underline{V} \triangleq \underline{z}_{\alpha,k} \quad (D.17)$$

em que

$\underline{z}_{\alpha,k}$  - vetor formado pela diferença dos elementos da matriz  $z_{BARRA}^0$ , pertencente ao grupo  $\alpha$ , onde  $k$  é a barra em que se injeta a corrente de 1,0 pu.

Portanto,

$$I_{p(l)q(l)} = Y_l \underline{z}_{\alpha,k} \quad (D.18)$$

Os elementos da coluna  $r$  e  $s$ , da matriz  $z^{aum}$ , são obtidos como se segue.

Os elementos  $z_{ir}$  para  $i \neq s$  são os mesmos da coluna  $q(l)$  da matriz  $Z$  original, isto é:

$$z_{ir} = z_{iq(l)} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (D.19)$$

Os elementos  $z_{si}$  são determinados injetando-se corrente de 1,0 pu em todas as barras  $i = 1, 2, \dots, n$ ; sendo  $i \neq r, s$  (Fig. D.3).

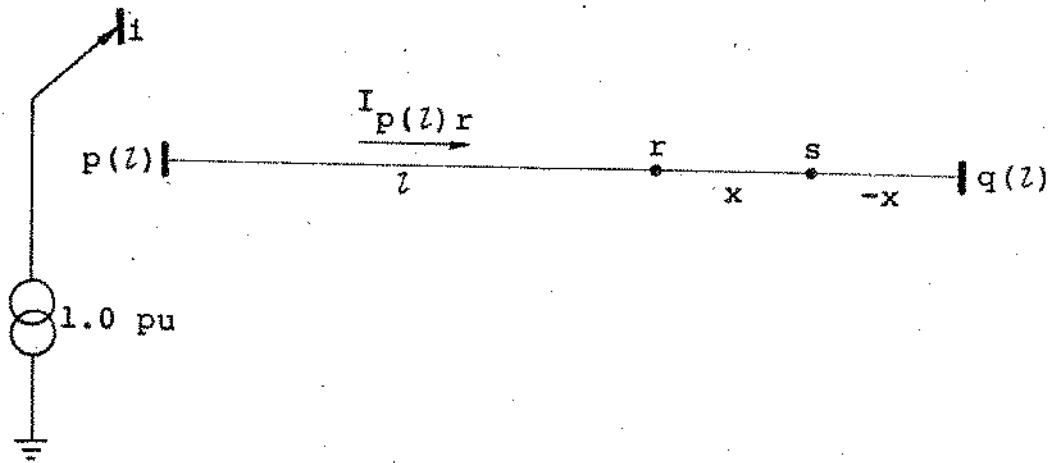


Fig. D.3 Injeção de corrente de 1.0 pu na barra  $i$ ,  
para  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $i \neq r, s$ .

Nesta condição as tensões nodais em  $r$  e  $s$  estão relacionadas por:

$$E_{s,i} = E_{r,i} - I_{p(l)r} x \quad (D.20)$$

Sendo

$$I_{p(l)r} = Y_\ell Z_{\alpha,i} \quad (D.21)$$

então,

$$Z_{si} = Z_{ri} - Y_\ell Z_{\alpha,i} x \quad (D.22)$$

Se

$$Y_\ell Z_{\alpha,i} \triangleq C_i \quad (D.23)$$

então,

$$Z_{ri} - Z_{si} = x C_i \quad (D.24)$$

Os elementos  $Z_{rr}$  e  $Z_{rs}$  são determinados injetando-se corrente de 1,0 pu em r (Fig. D.4).

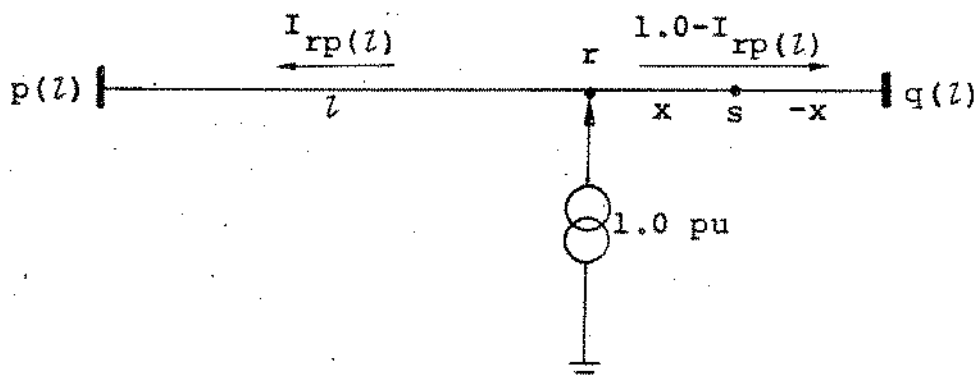


Fig. D.4 Injeção de corrente de 1.0 pu na barra r.

Nesta condição as tensões nodais em r e s se relacionam por:

$$E_{s,r} = E_{r,r} - x + I_{rp(l)} x \quad (D.25)$$

Sendo

$$I_{p(l)r} = Y_l Z_{\alpha,r} \quad (D.26)$$

então,

$$Z_{sr} = Z_{rr} - x - Y_l Z_{\alpha,r} x \quad (D.27a)$$

ou

$$Z_{rr} - Z_{sr} = (1,0 + C_r) x \quad (D.27b)$$

O elemento  $Z_{ss}$  é obtido injetando-se corrente de 1,0 pu em s (Fig. D.5).

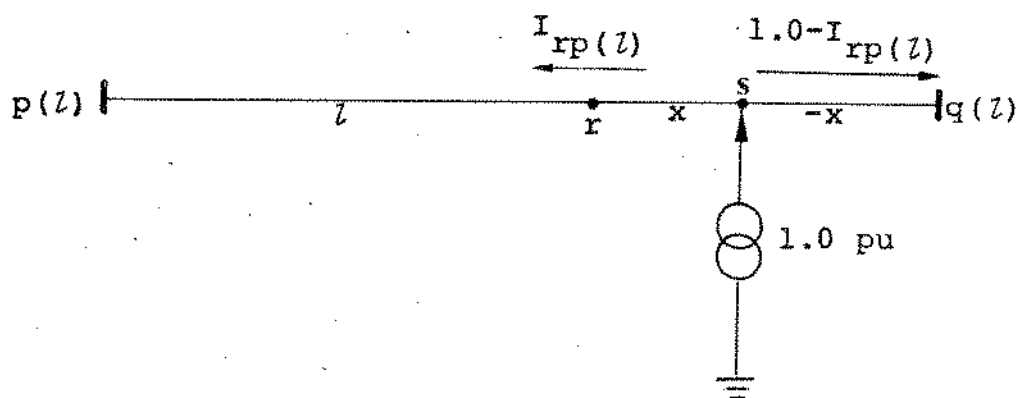


Fig. D.5 Injeção de corrente de 1.0 pu na barra s.

Nesta condição as tensões nodais em r e s se relacionam por:

$$E_{s,s} = E_{r,s} + I_{rp(l)} x \quad (D.28)$$

Sendo

$$I_{p(l)r} = Y_l Z_{\alpha,s(r)} \quad (D.29)$$

então,

$$Z_{ss} = Z_{rs} - Y_l Z_{\alpha,s(r)} x \quad (D.30)$$

Neste mesmo arranjo outra relação é obtida, em que as tensões nodais em s e q são relacionadas:

$$E_{s,s} = E_{q(l),s} - x + I_{rp(l)} x \quad (D.31)$$

então,

$$Z_{ss} = Z_{q(l)s} - x - Y_l Z_{\alpha,s(R)} x \quad (D.32)$$

De (D.30) e (D.32) tem-se:

$$z_{rs} = z_{q(l)s} - x \quad (D.33)$$

Sabendo-se que:

$$\underline{z}_{\alpha,s}(r) = \begin{bmatrix} z_{p(1)s} - z_{q(1)s} \\ \vdots \\ z_{p(l)s} - z_{rs} \end{bmatrix} \quad (D.34)$$

substituindo (D.33) em (D.34):

$$\underline{z}_{\alpha,s}(r) = \underline{z}_{\alpha,s} + \underline{x} \quad (D.35)$$

Substituindo (D.35) em (D.30):

$$z_{ss} = z_{rs} - y_l (\underline{z}_{\alpha,s} + \underline{x}) \cdot x \quad (D.36)$$

em que

$$\underline{z}_{\alpha,s} = \begin{bmatrix} z_{p(1)s} - z_{q(1)s} \\ \vdots \\ z_{p(l)s} - z_{q(l)s} \end{bmatrix} \quad (D.37)$$

Substituindo cada elemento de (D.37) por uma relação do tipo (D.24a) vem:

$$\underline{z}_{\alpha,s} = \begin{bmatrix} z_{p(1)r} - x c_{p(1)} - z_{q(1)r} + x c_{q(1)} \\ \vdots \\ z_{p(l)r} - x c_{p(l)} - z_{q(l)r} + x c_{q(l)} \end{bmatrix} \quad (D.38)$$

ou

$$\underline{Z}_{\alpha,s} = \begin{bmatrix} Z_{p(1)r} - Z_{q(1)r} \\ \vdots \\ Z_{p(\ell)r} - Z_{q(\ell)r} \end{bmatrix} - x \begin{bmatrix} C_{p(1)} - C_{q(1)} \\ \vdots \\ C_{p(\ell)} - C_{q(\ell)} \end{bmatrix} \quad (D.39)$$

ou

$$\underline{Z}_{\alpha,s} = \underline{Z}_{\alpha,r} - x \underline{C}_{\alpha} \quad (D.40)$$

Substituindo (D.40) em (D.36) tem-se:

$$Z_{ss} = Z_{rs} - Y_{\ell} (\underline{Z}_{\alpha,r} - x \underline{C}_{\alpha} + \underline{x}) x \quad (D.41a)$$

ou

$$Z_{ss} = Z_{rs} - Y_{\ell} \underline{Z}_{\alpha,s} + Y_{\ell} x^2 \underline{C}_{\alpha} - Y_{\ell\ell} x^2 \quad (D.41b)$$

De (D.27a) e (D.41b) obtêm-se:

$$Z_{ss} + Z_{rr} - 2 Z_{rs} - x = (Y_{\ell} \underline{C}_{\alpha} - Y_{\ell\ell}) x^2 \quad (D.42)$$

Se

$$(Y_{\ell} \underline{C}_{\alpha} - Y_{\ell\ell}) \triangleq P \quad (D.43)$$

então

$$Z_{ss} + Z_{rr} - 2 Z_{rs} - x = P x^2 \quad (D.44)$$

Substituindo (D.24b) e (D.44) em (D.12) vem:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \frac{C_i C_j}{P} \quad (D.45)$$

### D.3. Curto-circuito em fim de linha

Seja r - s uma linha de impedância x, sem acoplamen

to, o curto em fim de linha é simulado conforme a Fig. D.6.



Fig. D.6 Curto-circuito em fim de linha

Em termos matriciais esta configuração é dada por:

$$Z'' = \begin{array}{c|c} \begin{array}{c} 1 \\ \vdots \\ r \\ s \\ s' \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \\ \begin{array}{c} Z' \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \\ \begin{array}{c} Z''_{s'i} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \end{array} \end{array} \quad , i = 1, 2, \dots, s \quad (D.46)$$

Os elementos da coluna  $s'$  são dados por:

$$Z''_{is'} = Z'_{ir} \quad (D.47)$$

$$Z''_{s's'} = Z'_{rr} + x \quad (D.48)$$

sendo que os elementos  $Z'_{ir}$  e  $Z'_{rr}$  são obtidos pelo algoritmo (D.12).

Portanto:

$$Z''_{is'} = Z_{ir} - \frac{(Z_{ir} - Z_{is})(Z_{rr} - Z_{sr})}{Z_{rr} + Z_{ss} - 2Z_{rs} - x} \quad (D.49)$$

e

$$Z''_{s's'} = Z_{rr} - \frac{(Z_{rr} - Z_{sr})^2}{Z_{rr} + Z_{ss} - 2Z_{rs} - x} \quad (D.50)$$

A Fig. D.7 ilustra o caso de curto-circuito em fim de linha no caso de linhas com acoplamentos mútuos.



Fig. D.7 Simulação de curto em fim de linha, em linhas com mútuas.

Para esta condição o algoritmo é deduzido substituindo-se (D.24) e (D.27b) em (D.49) e (D.50), obtendo-se:

$$Z''_{is'} = Z_{iq(l)} - \frac{C_1 (1,0 + C_{q(l)})}{P} \quad (D.51)$$

e

$$Z''_{s's'} = Z_{q(l)q(l)} - \frac{(1,0 + C_{q(l)})^2}{P} + x \quad (D.52)$$

Fazendo-se x tender a zero tem-se:

$$Z''_{ir} = Z_{iq(l)} - \frac{C_1 (1,0 + C_{q(l)})}{P} \quad (D.53)$$

e

$$Z''_{rr} = Z_{q(l)q(l)} - \frac{(1,0 + C_{q(l)})^2}{P} \quad (D.54)$$



APÊNDICE E

MODIFICAÇÃO DA MATRIZ  $Y_{pri}$  NO ESTUDO  
DE ABERTURA DE UMA LINHA DO GRUPO DE  
LINHAS COM ACOPLAMENTOS MÚTUOS

Um dos problemas que surge durante o estudo de curto-circuito monofásico é a condição linha aberta de uma linha com acoplamento mútuo, pois além de simular a retirada da impedância própria da linha é preciso retirar também as impedâncias mútuas que ela apresenta com as outras linhas do grupo. Isto implica em recalcular os elementos da matriz de admitância primitiva  $Y_{pri}$  para a nova configuração.

Formar a matriz de impedância primitiva  $Z_{pri}$  para nova configuração e depois obter o novo  $Y_{pri}$  é um processo impraticável, pois o trabalho computacional exigido seria muito grande.

Este problema foi solucionado usando-se a fórmula de Woodbury, que é um método de se obter a inversa de uma matriz da nova configuração tendo-se a matriz inversa do caso básico.

Seja a Fig. - E.1, representando um grupo de linhas mutuamente acoplado.

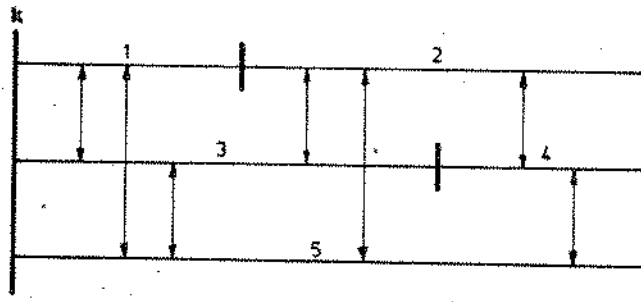


Fig. E.1 Grupo de linhas com acoplamento mútuo.

A configuração da matriz  $Z_{pri}$  desse grupo será:

x	0	x	0	x
0	x	x	x	x
x	x	x	0	x
0	x	0	x	x
x	x	x	x	x

Deseja-se analisar o curto-circuito monofásico na barra k com a linha 3 aberta, por exemplo. A abertura dessa linha pode ser simulada substituindo-a por uma linha com impedância própria de valor bastante elevado. Assim sendo, a corrente neste ramo será praticamente nula e conseqüentemente o efeito das mútuas também desaparecerá. Nesta condição a nova matriz  $Z'_{pri}$  terá a seguinte configuração:

x	0	x	0	x
0	x	x	x	x
x	x	$\alpha$	0	x
0	x	0	x	x
x	x	x	x	x

onde  $\alpha$  é a impedância elevada que substitui a impedância própria da linha 3.

A matriz  $Z'_{pri}$  pode ser escrita sob a forma,

$$Z'_{pri} = Z_{pri} + \alpha \underline{v} \underline{v}^t \quad (E.1)$$

onde o vetor  $\underline{v}$  tem todos os elementos nulos, exceto o correspondente à posição da linha aberta, que é ocupada pelo elemento unitário.

Invertendo as matrizes de ambos os membros da equação (E.1) tem-se:

$$(Z'_{pri})^{-1} = (Z_{pri} + \alpha \underline{v} \underline{v}^t)^{-1} \quad (E.2)$$

e a fórmula de Woodbury é dada por:

$$(Z_{pri} + \alpha \underline{v} \underline{v}^t)^{-1} = Z_{pri}^{-1} - \frac{(Z_{pri}^{-1} \underline{v}) (\underline{v}^t Z_{pri}^{-1})}{\alpha^{-1} + \underline{v}^t Z_{pri}^{-1} \underline{v}} \quad (E.3)$$

Como

$$\alpha^{-1} \rightarrow 0$$

e

$$Z_{pri}^{-1} = Y_{pri}$$

tem-se:

$$Y'_{pri} = Y_{pri} - \frac{(Y_{pri} \underline{v}) (\underline{v}^t Y_{pri})}{\underline{v}^t Y_{pri} \underline{v}} \quad (E.4)$$

No caso dado no exemplo tem-se:

$$\underline{v}^t = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

Portanto,

$$y'_{pri} = y_{pri} - \frac{\begin{bmatrix} y_{13} \\ y_{23} \\ y_{33} \\ y_{43} \\ y_{53} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} \end{bmatrix}}{y_{33}}$$

Seja por exemplo, o cálculo de fluxo na linha 2. Neste caso é preciso recalcular os elementos da coluna 2 da matriz  $y'_{pri}$ , como se segue:

$$\begin{bmatrix} y'_{12} \\ y'_{22} \\ y'_{32} \\ y'_{42} \\ y'_{52} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{12} \\ y_{22} \\ y_{32} \\ y_{42} \\ y_{52} \end{bmatrix} - \frac{y_{32}}{y_{33}} \begin{bmatrix} y_{13} \\ y_{23} \\ y_{33} \\ y_{43} \\ y_{53} \end{bmatrix}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- |1| GRAY, G.H. - "Design, construction, and test of an artificial power transmission line of the Telluride Power Co. of Provo, Utah". AIEE Trans. v.36: 789-831, 1917.
- |2| FORTESCUE, C.L. - "Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase network". AIEE Trans. v. 37, pt.2: 1027-1140, 1918.
- |3| SHURIG, O.R. - "A miniature a.c. transmission system for the practical solution of network and transmission systems problems". AIEE Trans. v.42: 831-840, 1923.
- |4| SHURIG, O.R. - "Experimental determination of short-circuit current in electric power network". AIEE Trans. v.42: 11-13, 1923.
- |5| SHURIG, O.R. et alii - "The M.I.T. network analyser: design and application to power system problem". AIEE Trans. 49(3): 1102-1114, July, 1930.
- |6| HOLBECK, J.I. & LANTZ, M.J. - "The effect of mutual induction between parallel transmission lines on current flow to ground faults". AIEE Trans. v.62: 712-715, 1943.
- |7| HARDER, E.L. & MACCANN, G.D. - "A large-scale general purpose electric analog computer". AIEE Trans. v.67, pt.1: 664-673, 1948.
- |8| GLIMM, E.L. et alii - "Digital calculation of network impedances". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.74, pt.3: 1285-1297, 1955.

- |9| WARD, J.B. & HALE, H.W. - "Digital computer solution of power flow problems". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.75, pt.3: 398-404, 1956.
- |10| COOMBE, L.W. & LEWIS, D.G. - "Digital calculation of short-circuit currents in large complex impedance". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.75, pt.3: 1394-1397, 1956.
- |11| WARD, J.B. & HALE, H.W. - "Digital computation of driving point and transfer impedance". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.76, pt.3: 476-481, 1957.
- |12| LANTZ, M.J. - "Digital short-circuit solution of power system network including mutual impedance". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.76, pt.3: 1230-1235, 1957.
- |13| BYERLY, R.T. et alii - "Digital calculation of power system network under faulted condition". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.77, pt.3: 1296-1307, 1958.
- |14| SIEGEL, J.C. & BILLS, G.W. - "Nodal representation of large complex - element network including mutual reactances". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.77, pt.3: 1226-1229, 1958.
- |15| TOALSTON, A.L. - "Digital solution of short-circuit currents for networks including mutual impedances". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.78, pt.3: 1720-1725, 1959.
- |16| KARLSEN, T. & WALLHAUSEN, H.A. - "A device for solving mutual induction problems on a d-c network analyser". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.78, pt.3A: 754-757, 1959.

- |17| BROWN, H.E. et alii - "Digital calculation of three-phase short-circuits by matrix methods". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.79, pt.3: 1277-1282, 1960.
- |18| SATO, N. - "Digital calculation of network inverse and mesh transformation matrices". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.79, pt.3: 719-726, 1960.
- |19| TAYLOR, G.E. et alii - "New digital computer short-circuit program for relay studies". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.79, pt.3: 1257-1264, 1960.
- |20| EL-ABIAD, A.H. - "Digital calculation of line-to-ground short circuits by matrix method". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.79, pt.3: 323-332, 1960.
- |21| VAN NESS, J.E. & GRIFFIN, J.H. - "Elimination methods for load-flow studies". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.80, pt.3: 299-305, 1961.
- |22| SATO, N. & TINNEY, W.F. - "Techniques for exploiting the sparsity of the network admittance matrix". AIEE Trans. Power Apparatus Systems. v.82: 944-950, Dec., 1963.
- |23| TINNEY, W.F. & WALKER, J.W. - "Direct solution of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization". Proceeding IEEE. 55(11): 1801-1809, Nov., 1967.
- |24| BROWN, H.E. & PERSON, C.E. - "Short-circuit studies of large systems by the impedance matrix method". In: Proceedings IEEE PICA Conf., Pittsburgh, Pa., 1967, p. 335-342.

- |25| ANGELINI, A.M. - "Transformation of networks containing mutual inductive coupling into equivalent circuit systems with no mutual coupling". IEEE Trans. Power Apparatus Systems. 87(7): 1565-1572, July, 1968.
- |26| STAGG, G.W. & EL-ABIAD, A.H. - Computer methods in power system analysis. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1968.
- |27| ZOLLENKOPF, K. - "Nodal impedance matrix of systems including mutuals, computed by inversion of the nodal admittance matrix". In: Proceeding PSCC, Rome, 1969, p.1-5 (paper N.A.1).
- |28| DESOER, C.A. & KUH, E.S. - Basic circuit theory. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1969.
- |29| REITAN, D.K. & KRUEMPEL, K.C. - "Modification of the bus impedance matrix for systems changes involving mutual coupling". Proceeding IEEE, 57(8): 1432-1433, Aug., 1969.
- |30| STORRY, J.O. & BROWN, H.E. - "An improved method of incorporating mutual coupling in single-phase short-circuit calculating". IEEE Trans. Power Apparatus Systems. 89(1): 71-77, Jan., 1970.
- |31| DY LIACCO, T.E. & RAMARAO, K.A. - "Short-circuit calculation for multiline switching and end fault". IEEE Trans. Power Apparatus Systems. 89(6): 1226-1237, July/Aug., 1970.
- |32| ELGERD, O.I. - Electric energy systems theory: an introduction. New York, McGraw-Hill, 1971.
- |33| DANIELS, H.A. & CHEN, M.S. - "Compensation of mutual coupling in the formation of the bus impedance matrix".



IEEE Trans. Power Apparatus Systems. 90(5): 1007-1016,  
May/June, 1971.

- |34| ZOLLENKOPF, K. - "Bi-factorization basic computation algorithm and programming techniques". In: REID, J. K. ed. - Large sparse sets of linear equations. New York, Academic press, 1971, p.75-97.
- |35| TAKAHASHI, K. et alii - "Formation of a sparse bus impedance matrix and its application to short-circuit study". In: Proceedings IEEE PICA Conf., Minneapolis, 1973, p.63-69, (paper N° TP.11-B).
- |36| TOSH, J.B. & RINDT, L.J. - "An elimination method for calculating short-circuit equivalents". In: Proceedings IEEE PICA Conf., Minneapolis, 1973, p.383-385.
- |37| ZOLLENKOPF, K. - "Sparse nodal impedance matrix generated by the bi-factorization method and applied to short-circuit studies". In: Proceedings PSCC, London, 1975, p.1-13 (paper 3. 1/3).
- |38| BROWN, H.E. - Solution of large networks by matrix methods. New York, John Wiley, 1975.
- |39| UNDRIL, J.M. & KOSTYNIK, T.E. - "Advanced power system fault analysis method". IEEE Trans. Power Apparatus Systems. 94(6): 2141-2150, Nov./Dec., 1975.
- |40| CREVIER, D. et alii - "The effect of shunt elements and loads on short-circuit calculations for EHV lines". In: Fall meeting of the Canadian Electrical Association, Edmonton, Alta, Canada, 1975, p.41-56.
- |41| WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION - Applied protective relaying. New Jersey, A Silent Sentinels Publication, 1976.

- [42] BURIAN Jr., Y. - Circuitos elétricos. Rio de Janeiro, Almeida Neves, 1977.
- [43] BROUSOLE, F. - "State estimation on power systems: detecting bad data through the sparse inverse matrix method". IEEE Trans. Power Apparatus Systems. 97(3): 678-682, May/June, 1978.
- [44] TITARENKO, M. & NOSKOV-DUKELSKY, I. - Protective relaying in electric power systems. Moscow, Peace Publishers, s.d.