

+ A ANÁLISE DE MALHA APLICADA AO ESTUDO
DE FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS RADIAIS

por

DAGOBERTO LOURENÇO RIBEIRO

TESE DE MESTRADO

- Apresentada à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Campina Grande, Fevereiro de 1980

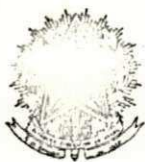


R484a Ribeiro, Dagoberto Lourenço.
A análise de malha aplicada ao estudo de fluxo de carga em sistemas radiais / Dagoberto Lourenço Ribeiro. - Campina Grande, 1980.
67 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1980.
"Orientação: Prof. Dr. Drumond Xavier Cavalcanti".
Referências.

1. Sistemas Elétricos. 2. Sistemas Radiais. 3. Fluxo de Carga - Sistemas Elétricos de Potência. 4. Ciências - Dissertação. I. Cavalcanti, Drumond Xavier. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB)

CDU 621.311(043)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Coord. Pós-Graduação Eng^a Elétrica
Av. Aprígio Veloso s/n-Caixa Postal 518
Campina Grande - Pb.

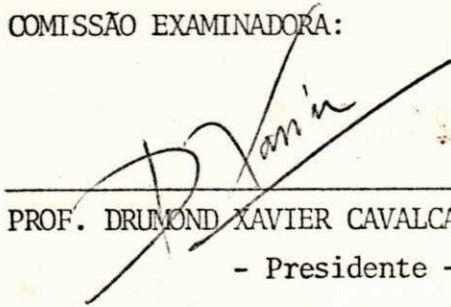
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DAGOBERTO LOURENÇO RIBEIRO

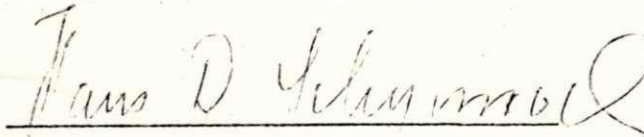
TÍTULO: "A Análise de Malha Aplicada ao Estudo de Fluxo de Carga em Sistemas Radiais"

CONCEITO: Aprovado

COMISSÃO EXAMINADORA:



PROF. DRUMOND XAVIER CAVALCANTI LIMA - Ph.D
- Presidente -



PROF. HANS DIETER SCHYMROCH - Ph.D



PROF. WASHINGTON EVANGELISTA DE MACEDO - M.Sc

Campina Grande, 07 de fevereiro de 1980.

OFERECIMENTO

A meus pais e à minha esposa

A meus avós e a meus irmãos

ofereço este trabalho.

EM MEMÓRIA

De

Airton Aluizio da Cunha Castro , meu
amigo Nen.

AGRADECIMENTOS

A

Drumond Xavier Cavalcanti Lima

Maria José Pontes Afonso de Carvalho

Lucimar Ribeiro Gomes

agradeço pela contribuição que deram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho faz a aplicação da análise de malha ao estudo de fluxo de carga, tendo como principal meta a sua aplicação em sistemas praticamente radiais.

O método foi aplicado na resolução do fluxo de carga DC, para isto elaborando-se um programa para computador digital. Os resultados obtidos quando aplicados a três sistemas distintos, utilizando-se o método abordado, foram comparados, do ponto de vista de precisão e velocidade, aos resultados provenientes da aplicação dos programas de Fluxo de Carga AC e Simplificado da Philadelphia Power Electrical Company.

ABSTRACT

The Load Flow problem is studied through the application of the mesh analysis method to power systems with radial configuration.

A computer program was developed using this method to solve the DC Load Flow. The results were compared in accuracy and computing time to those given by the AC and Simplified Digital Load Flow Programs developed by the Philadelphia Power Electrical Company.

INDICE

	PÁGINA
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA....	6
2.1 - Conceitos básicos em teoria dos grafos.....	6
2.2 - Conceitos introdutórios à análise de malha.....	11
2.3 - Análise de malha na resolução de circuitos.....	14
2.3.1 - Um exemplo.....	14
2.3.2 - Formulação Geral.....	19
2.3.3 - Como proceder para <u>ini</u>	

circularizar o problema.....	24
2.4 - Implementação do método.....	28
2.4.1 - Método para obtenção da matriz $[L]$	28
2.4.1.1 - Justificativa teórica.....	28
2.4.1.2 - Obtenção de $[L]$ a partir de $[C]$	31
2.4.1.3 - Um esquema de renumeração de barras e linhas.	35
2.4.2 - Obtenção da matriz de <u>im</u> pedância de malha.....	40
2.5 - Aplicação da análise de malha ao fluxo de carga DC.....	41
CAPÍTULO III - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	44
3.1 - O Programa.....	45
3.2 - Os resultados.....	47

3.3 - Análise dos resultados.....	57
3.3.1 - Precisão.....	57
3.3.2 - Velocidade/Memória.....	60
 CAPÍTULO IV - CONCLUSÕES.....	 64
 REFERÊNCIAS	 66

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Um ESTUDO DE FLUXO DE CARGA (EFC) é a determinação das condições de operação estáticas de um Sistema de Potência (SP). Isto é, um EFC destina-se a encontrar tensão e fase nodais e fluxo de potência nas linhas de um SP em regime permanente.

A partir de 1956 muita ênfase tem-se dado ao EFC devido à grande complexidade dos SP e à grande gama de aplicações que ele tem encontrado, tais como Planejamento, Operação, Otimização e Estabilidade de Sistemas de Potência.

Uma questão que persegue os estudiosos do assunto e talvez a de mais difícil resposta é: Qual o melhor método a ser escolhido para uma dada aplicação? A dificuldade surge do fato de que os métodos utilizados tem suas característi

cas afetadas pelo tipo e tamanho além de ser influenciado pelas peculiaridades do sistema em estudo. A escolha do método deve ser precedida de uma comparação entre as características relevantes de cada um deles. Isto é, deve haver um compromisso entre precisão, velocidade, utilização de memória, versatilidade e simplicidade de cada método.

Inicialmente, era prática usual utilizar métodos iterativos baseados na construção da matriz Y [BARRA] que apesar de sua lenta convergência apresentava pequena exigência de capacidade de memória em decorrência de Y [BARRA] ser uma matriz esparsa. Uma grande vantagem deste método é a simplicidade na formulação matemática. Uma grave deficiência deste método é a confiabilidade. A não convergência do método em alguns casos levou a formulação do problema através de métodos que se utilizavam da matriz Z [BARRA] como alternativa para uma maior confiabilidade na convergência.

Para sistemas de grande porte, no entanto, esta formulação do problema exige elevada capacidade de memória e o tempo de processamento é grande. Van Ess em 1959 e posteriormente em 1961 com Griffin mostraram que o método de Newton-Raphson era muito confiável na resolução de problemas de fluxo de carga. No entanto, a esta altura, esta formulação se mostrava incompetitiva com os outros métodos devido à sua grande exigência de memória e também de tempo de processamento. O método de Newton-Raphson tomou grande impulso na análise de sistemas de potência a partir de 1967 quando Tinney juntamente com Walker e Hart desenvolveram métodos de ordenação e armazenamento de sistemas esparsos que o tornou competitivo com

os demais. A partir daí, o método de Newton passou a ser o mais utilizado dos métodos devido à sua competitividade computacional e à sua versatilidade. Uma das características importantes deste método é que para um mesmo sistema o número de iterações necessário para a convergência é independente da escolha da barra de balanço.

Os métodos a que nos referimos até agora utilizam-se da análise nodal para a sua formulação. Isto é, as equações que devem ser resolvidas advêm da aplicação da lei de Kirchoff das correntes em todos os nós. Com isto, o número de equações explícitas que se tem para resolver num sistema de NB barras é $2(NB - 1)$ para um sistema onde todas as barras são de carga, com exceção da barra de balanço. Num sistema com barras de Tensão controlada, como é o caso geral, o número de equações não é muito diferente do anterior. Em sistemas onde o número de barras é comparável ao número de linhas pode-se tirar proveito de uma análise de malha na obtenção das equações do sistema, visto que o número de equações explícitas a ser resolvido será $2(NL - NB + 1)$ onde $(NL - NB + 1)$ é o número de malhas do sistema. Este tipo de análise é evitada em sistemas onde o número de linhas é cerca de 20% superior ao número de barras, porque o esforço despendido na obtenção dos coeficientes da matriz representativa do sistema não compensa a redução do número de equações a ser resolvido. De qualquer modo, os coeficientes da matriz resultante da análise de malha são sempre mais estáveis do que os obtidos na análise nodal, isto é, os coeficientes são menos sensíveis a modificações na configuração do sistema. Por exemplo, em análise de contingência

retirando-se uma linha do sistema obrigatoriamente deixam de existir dois elementos fora da diagonal e dois elementos na diagonal tem seus valores modificados, quando se utiliza análise nodal, modificando-se automaticamente a matriz em estrutura e em valores. Quando se utiliza análise de malha a estrutura da matriz só se modifica se uma linha retirada for um link e os valores dos coeficientes só são alterados quando uma linha retirada faz parte de alguma malha. O Trabalho ora apresentado, visa tirar proveito das características particulares da análise de malha aplicada ao Estudo de Fluxo de Carga, a bordada em 1968 por TAKAHASHI e SEKINE.

No Capítulo II nós mostramos como aplicar a análise de malha ao estudo de fluxo de carga. Neste capítulo nós introduzimos os conceitos de grafos necessários à formulação do problema e estabelecemos as leis de Kirchoff na forma matricial. Em um exemplo, nós mostramos como usar a análise de malha no estudo de fluxo de carga e mais adiante formalizamos o problema de uma maneira geral. Pouco depois nós abordamos a questão da inicialização do problema e da obtenção da matriz de incidência linha - malha $[L]$ a partir da matriz de incidência barra - linha $[C]$. Mais adiante nós abordamos um esquema de renumeração de barras e linhas que tem como objetivo facilitar a obtenção de $[L]$ a partir de $[C]$. Em consequência da obtenção de $[L]$ nós partimos para a construção da matriz MALHA e o ponto final do capítulo é dado ao fazermos a aplicação da análise de malha ao fluxo de carga DC.

O Capítulo III é destinado inicialmente a apresentar o programa do ponto de vista de blocos que executam fun

ções tais como renumerar barras e linhas, obter matrizes de incidência, formar a matriz impedância de malha, proceder a inicialização do problema e obter a sua solução. O restante do capítulo é destinado a fazer a apresentação dos resultados obtidos ao utilizar-se a análise de malha em paralelo com os obtidos utilizando-se as versões AC e Simplificada do Fluxo de Carga da Philadelphia Electrical Company (PECO) com o objetivo de comparar os resultados obtidos pelos diferentes métodos sob os aspectos de precisão, tempo de solução e utilização de memória.

Utilizamos o capítulo IV para tirar as conclusões resultantes do capítulo em que apresentamos e discutimos os resultados.

CAPÍTULO II

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

2.1 - Conceitos básicos em teoria dos grafos

Como na formulação matemática do problema do fluxo de carga pela análise de malha utiliza-se teoria dos grafos, damos aqui uma introdução a este assunto.

Um grafo é um conjunto de pontos denominados nós, conectados por um conjunto de retas denominadas ramos. Cada ramo é conectado a dois nós distintos e tem a orientação especificada por uma seta. Num sistema de potência os nós são as barras e os ramos são as linhas. A figura 2.1 é um exemplo de um sistema de potência e a figura 2.2 é o grafo deste sistema. Neste grafo, os ramos foram orientados no sentido do menor para o maior nó.

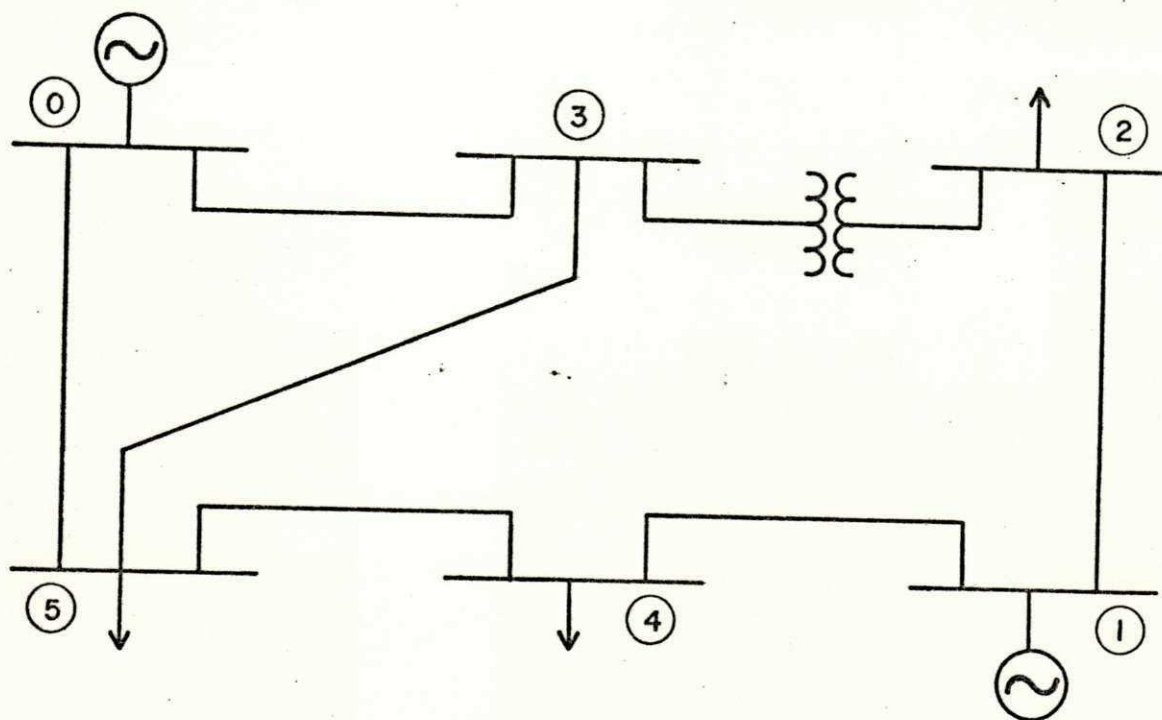


FIGURA 2.1 — DIAGRAMA UNIFILAR DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

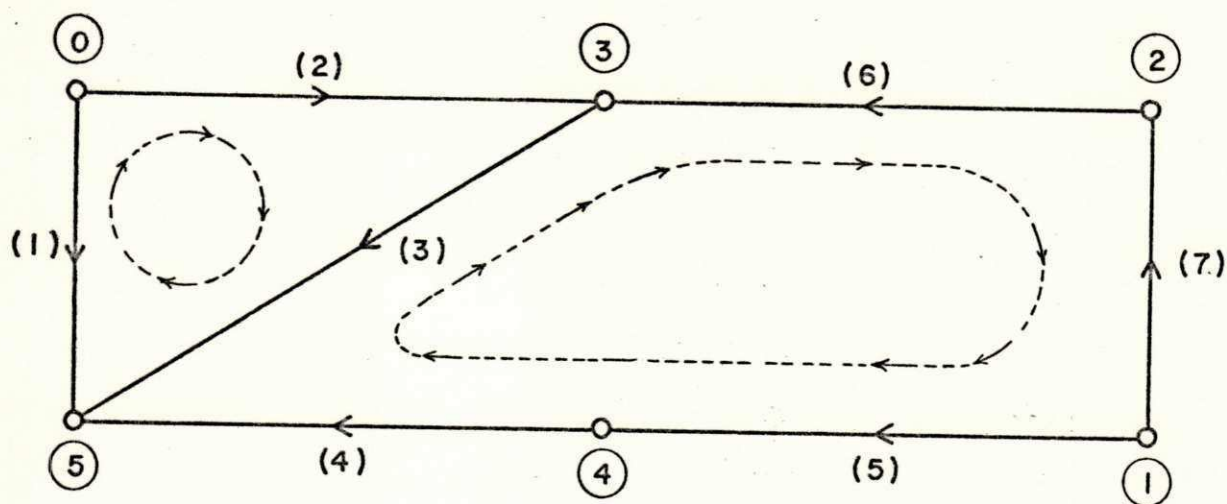


FIGURA 2.2 — GRAFO DO SISTEMA DE POTÊNCIA DA FIGURA 2.1

Um grafo pode ser representado "analiticamente" a través de uma matriz de incidência que represente a conexão das linhas com as barras. Nesta matriz, se o ramo R começa no nó N a posição (R, N) da matriz é ocupada com +1. Se o nó N é o fim do ramo R, a posição (R, N) é ocupada com -1 e se nenhum destes casos ocorrer, a posição (R, N) é ocupada com 0. A matriz de incidência nó-ramo (ou barra-linha) do grafo da figura 2.2 é mostrado na tabela 2.1.

RAMO →	1	2	3	4	5	6	7
NÓ ↓							
1					1		1
2						1	-1
3		-1	1			-1	
4				1	-1		
5	-1		-1	-1			

TABELA 2.1 - Matriz incidência barra-linha do grafo da figura 2.2

É importante notar que as colunas desta matriz são linearmente independentes. Isto é, nenhuma coluna pode ser obtida da outra através de operações lineares. O mesmo pode ser dito com respeito às linhas da matriz. Apesar da representação matricial do grafo de sistemas de potência ser bastante eficaz visualmente, ela é bastante ineficiente do ponto de vista computacional, pois necessitaríamos de uma dimensão $(NB - 1) \times NL$ para armazenar esta matriz. Uma outra maneira de dar a mesma informação é através de um vetor. Este vetor, indica para cada linha a sua barra de saída e a sua barra de chegada, necessitando portanto, somente de uma dimensão $2NL \times 1$

para armazenar a mesma informação. O vetor que substitui a matriz anterior é mostrado a seguir:

1	0 5	1 -1
2	0 3	1 -1
3	3 5	1 -1
4	4 5	1 -1
5	1 4	1 -1
6	2 3	1 -1
7	1 2	1 -1

Observamos que não há necessidade de um vetor apontador pois o número da linha permite calcular diretamente a sua posição de armazenamento.

Um CAMINHO de um nó i a um nó j em um grafo é definido como uma sequência de ramos que começa no nó i e termina no nó j . Os ramos de um caminho não necessariamente têm a mesma orientação.

Uma MALHA é um CAMINHO onde o início e o fim são coincidentes. Desta definição excluimos a possibilidade de uma

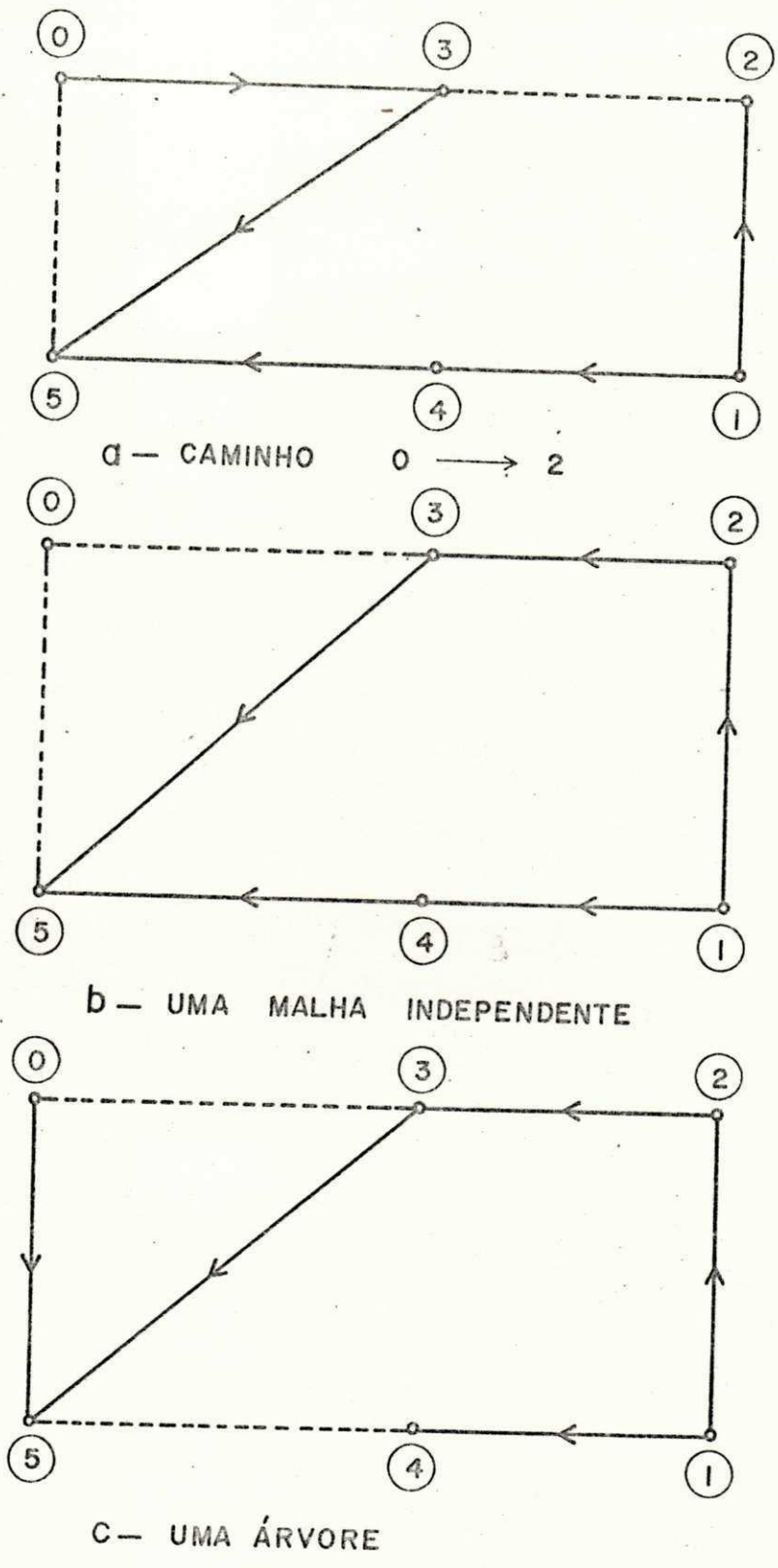


FIGURA 2.3 - EXEMPLO DE CAMINHO, MALHA E ÁRVORE

malha formada por um único ramo o que significaria dizer que um mesmo ramo teria sido percorrido nos dois sentidos para formar a malha.

Uma ÁRVORE é um conjunto de ramos que conecta todos os nós de um grafo sem que haja formação de malhas. A figura 2.3 mostra um caminho, uma malha e uma árvore da figura 2.2. Os ramos que não entram na formação da árvore serão denominados a partir daqui de "links".

Observemos na figura 2.3 que o número de malhas independentes é igual ao número de ramos que não participaram da formação da árvore. Isto é, o número de malhas independentes é igual ao máximo número de ramos que se pode retirar de um grafo sem que ele fique desconexo. O número de malhas (NLOOP) pode ser determinado pela relação $NLOOP = NL - (NB - 1)$, onde NL é o número de ramos e NB é o número de nós do grafo, incluído o de referência.

2.2 - Conceitos introdutórios à análise de malha

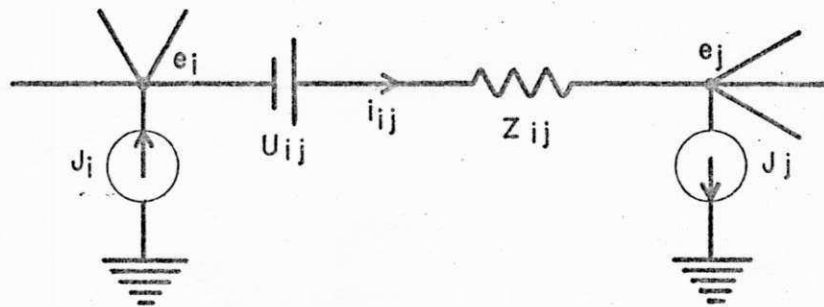
Neste parágrafo nós introduzimos os conceitos básicos para a resolução de circuitos pela análise de malha. Utilizamos também a matriz de incidência do parágrafo anterior para formular matematicamente as leis de Kirchoff.

A distribuição de fluxo num sistema de potência é determinada pelas características das linhas, pelas tensões das barras e ainda pelas interconexões entre as barras do sis

tema, isto é, pela topologia da rede. Para formular o EFC, a cada linha ij nós associamos uma impedância Z_{ij} , uma fonte de tensão U_{ij} e, uma corrente i_{ij} . A cada barra estão associadas uma tensão e_i e uma injeção de corrente J_i . Estas variáveis estão relacionadas através das equações:

$$J_i = \sum_j i_{ij} \quad \text{para toda barra } i \quad (1)$$

$$e_i - e_j = v_{ij} = U_{ij} - Z_{ij} i_{ij} \quad \text{para toda linha } (ij) \quad (2)$$



As equações (1) e (2) são as leis de Kirchoff da tensão e da corrente respectivamente.

Para o sistema da figura 2.1, cujo grafo está representado na figura 2.2, o sistema de equações (1) é :

$$\begin{array}{rcccccc}
 \text{nó 1} & & & & +I_5 & & +I_7 & = & J_1 \\
 \text{nó 2} & & & & & +I_6 & -I_7 & = & J_2 \\
 \text{nó 3} & & -I_2 & +I_3 & & & -I_6 & = & J_3 \\
 \text{nó 4} & & & & +I_4 & -I_5 & & = & J_4 \\
 \text{nó 5} & -I_1 & & -I_3 & -I_4 & & & = & J_5
 \end{array} \quad (3)$$

onde $I_\ell = i_{ij}$

onde ℓ é a linha que começa em i e termina em j

O sistema de equações (3) pode ainda ser escrito assim :

$$\begin{aligned}
 0I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 0I_4 + 1I_5 + 0I_6 + 1I_7 &= J_1 \\
 0I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 0I_4 + 0I_5 + 1I_6 - 1I_7 &= J_2 \\
 0I_1 - 1I_2 + 1I_3 + 0I_4 + 0I_5 - 1I_6 + 0I_7 &= J_3 \\
 0I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 1I_4 - 1I_5 + 0I_6 + 0I_7 &= J_4 \\
 -1I_1 + 0I_2 - 1I_3 - 1I_4 + 0I_5 + 0I_6 + 0I_7 &= J_5
 \end{aligned}$$

ou

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A matriz de coeficientes do sistema de equações (4) é a matriz de incidência barra-linha a que já nos referimos anteriormente e, que tem dimensão $(NB - 1) \times NL$. A partir do sistema de equações (4) a lei de Kirchoff dos nõs pode ser escrita assim:

$$\begin{bmatrix} c \end{bmatrix} \bar{T} = \bar{J} \quad (5)$$

onde:

\bar{T} é o vetor das correntes nas linhas

\bar{J} é o vetor de injeções de corrente nas barras

O sistema de equações (2) para o mesmo sistema é:

$$\begin{array}{rcll}
 \text{linha 1} & & & -e_5 & = & V_1 \\
 \text{linha 2} & & & -e_3 & = & V_2 \\
 \text{linha 3} & & & e_3 & -e_5 & = & V_3 \\
 \text{linha 4} & & & & e_4 & -e_5 & = & V_4 \\
 \text{linha 5} & & e_1 & & & -e_4 & = & V_5 \\
 \text{linha 6} & & & e_2 & -e_3 & & = & V_6 \\
 \text{linha 7} & & e_1 & -e_2 & & & = & V_7
 \end{array}$$

onde $V_\ell = v_{ij}$

onde ℓ é a linha que começa em i e termina em j

Seguindo o mesmo procedimento anterior, a lei de Kirchoff da tensão é expressa assim :

$$\left[C \right]^t \bar{E} = \bar{V} \quad (6)$$

2.3 - Análise de malha na resolução de circuitos

2.3.1 - Um exemplo

Consideremos o circuito da figura 2.1 no qual desejamos determinar o fluxo de potência em todas as linhas. O circuito é mostrado na figura 2.4 com todas as potências nodais e as impedâncias das linhas. Neste exemplo nós admitiremos que todas as tensões nodais são iguais a 1,0 p.u., o que significa dizer que:

$$J_i = P_i \quad e$$

$$I_\ell = F_\ell \quad (F \rightarrow \text{Fluxo de Potência})$$

Para o circuito dado nós desejamos encontrar I_1 ; I_2 ; I_3 ; ; I_7 . Para que as correntes estejam corretas é necessário que :

$$I_5 + I_7 = 0,50$$

$$I_6 - I_7 = -0,55$$

$$-I_2 + I_3 - I_6 = 0,00$$

$$I_4 - I_5 = -0,30$$

$$-I_1 - I_3 - I_4 = -0,50$$

que são as equações que representam a lei de Kirchoff aplicada aos nós de 1 a 5 do circuito. Observemos que a lei de Kirchoff aplicada ao nó 0 é redundante pois a potência (ou a corrente) gerada nesta barra é determinada pela potência nas $(N - 1)$ barras restantes do sistema.

Um conjunto de valores que satisfaz a este sistema de equações é :

$$I_5^0 = 0,40 \quad I_7^0 = 0,10 \quad I_6^0 = -0,45 \quad I_2^0 = 0,65$$

$$I_3^0 = 0,20 \quad I_4^0 = 0,10 \quad e \quad I_1^0 = 0,20 \quad \text{ou:}$$

$$I^0 = \{ 0,20; 0,65; 0,20; 0,10; 0,40; -0,45; 0,10 \}$$

Para que o conjunto de valores I^0 seja a solução do problema, é necessário que a lei de Kirchoff das malhas se

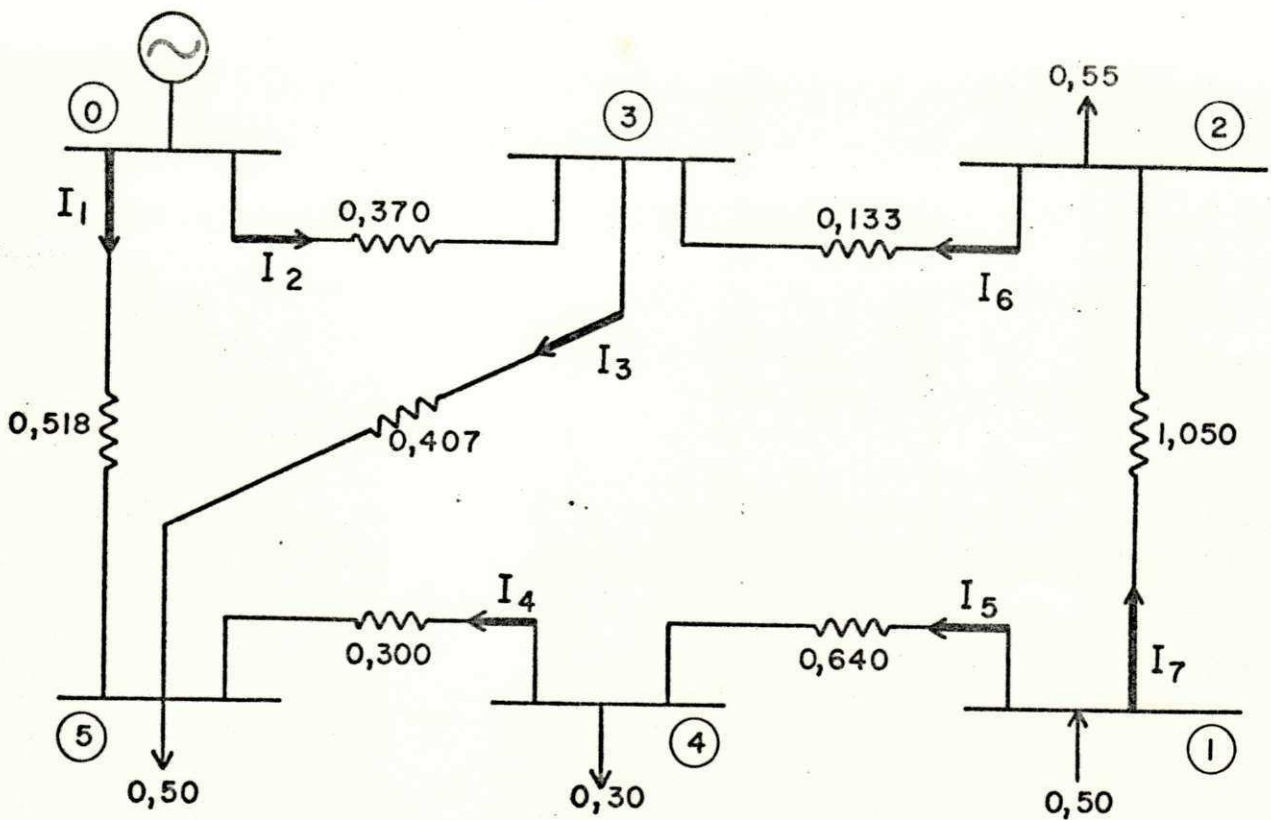


FIGURA 2.4 — SISTEMA WARD AND HALE

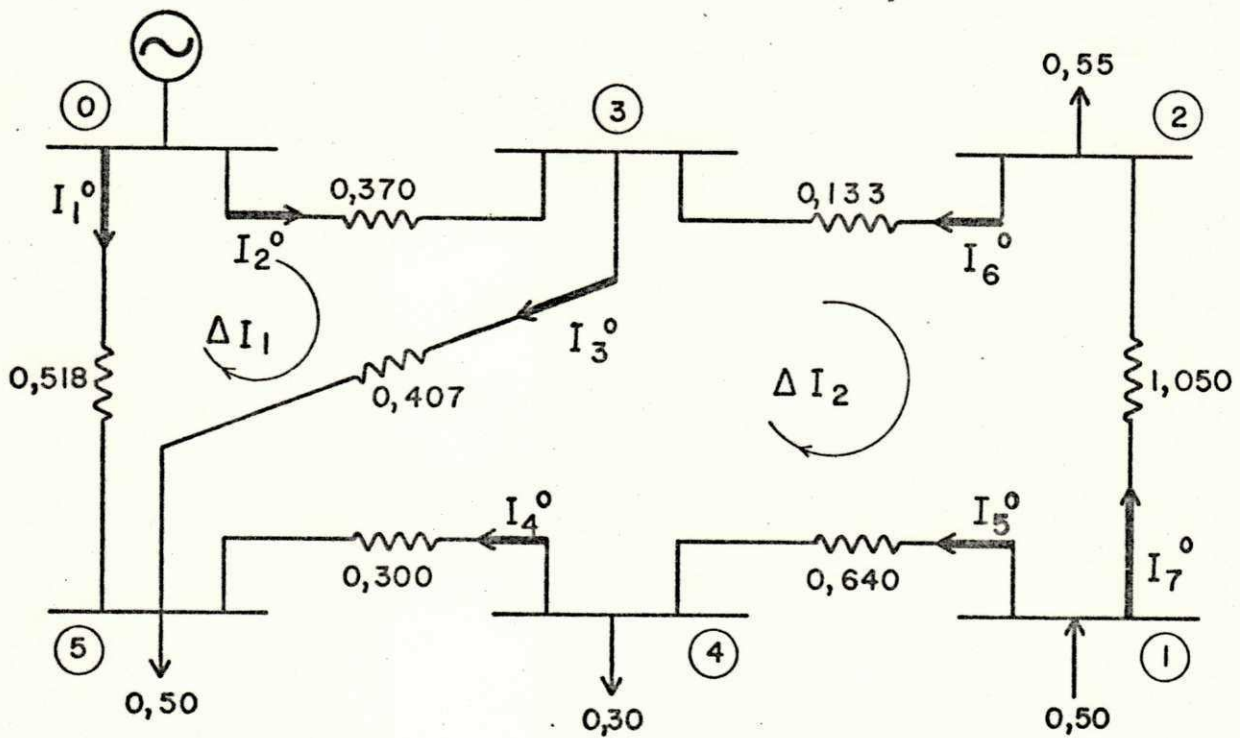


FIGURA 2.5 — INCREMENTOS DADOS ÀS CORRENTES PARA QUE A LEI DAS MALHAS SEJA SATISFEITA

ja satisfeita. Apliquemos a lei das malhas ao circuito da fi
gura 2.4 caminhando em cada malha no sentido horário :

$$\begin{aligned} \text{Malha 1 (Barras 0, 3 e 5)} &= I_2 \times 0,370 + I_3 \times 0,407 - I_1 \times 0,518 = \\ &= 0,65 \times 0,370 + 0,20 \times 0,407 - 0,20 \times 0,518 = \\ &= 0,2183 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Malha 2 (Barras 1, 2, 3, 4 e 5)} &= -I_6 \times 0,133 - I_7 \times 1,050 + I_5 \times 0,640 + \\ &+ I_4 \times 0,300 - I_3 \times 0,407 = \\ &= 0,45 \times 0,133 - 0,10 \times 1,050 + 0,40 \times 0,640 \\ &+ 0,10 \times 0,300 - 0,20 \times 0,407 = \\ &= 0,15945 \end{aligned}$$

Dos resultados anteriores fica evidente que os va
lores de I^0 não são a solução do problema. Portanto, é neces
sário que determinemos os incrementos que os valores de I^0 de
vem sofrer para que também satisfaçam à lei das malhas. Na fi
gura 2.5, estes incrementos são denominados de ΔI .

Aplicando agora a lei das malhas ao circuito da fi
gura 2.5 teremos:

$$\begin{aligned} \text{Malha 1: } &(\Delta I_1 - I_1^0) 0,518 + (\Delta I_1 + I_2^0) 0,370 + (\Delta I_1 - \Delta I_2 + I_3^0) 0,407 = \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Malha 2: } &(\Delta I_2 - \Delta I_1 - I_3^0) 0,407 + (\Delta I_2 + I_4^0) 0,40 + (\Delta I_2 + I_5^0) 0,64 \\ &+ (\Delta I_2 - I_6^0) 0,133 + (\Delta I_2 - I_7^0) 1,05 = 0 \end{aligned} \quad \text{ou:}$$

$$\begin{bmatrix} 1,295 & -0,407 \\ -0,407 & 2,530 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,2183 \\ -0,15945 \end{bmatrix} \quad \text{ou}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3,111} \begin{bmatrix} 2,530 & 0,407 \\ 0,407 & 1,295 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,2183 \\ -0,15945 \end{bmatrix}$$

$$\Delta I_1 = -0,1984$$

$$\Delta I_2 = -0,0949$$

Portanto,

$$I_1 = I_1^0 - \Delta I_1 = 0,20 - (-0,1984) = 0,3984$$

$$I_2 = I_2^0 + \Delta I_1 = 0,65 - 0,1984 = 0,4516$$

$$I_3 = I_3^0 + \Delta I_1 - \Delta I_2 = 0,20 - 0,1984 + 0,0949 = 0,0965$$

$$I_4 = I_4^0 + \Delta I_2 = 0,10 - 0,0949 = 0,0051$$

$$I_5 = I_5^0 + \Delta I_2 = 0,40 - 0,0949 = 0,3051$$

$$I_6 = I_6^0 - \Delta I_2 = -0,45 + 0,0949 = -0,3551$$

$$I_7 = I_7^0 - \Delta I_2 = 0,10 + 0,0949 = 0,1949$$

Observemos que, com estas correntes, a lei dos nós ainda  bececida. Se nós aplicarmos agora a lei das malhas obteremos:

$$\begin{aligned} \text{Malha 1 } \Delta V &= -0,3984 \times 0,518 + 0,451 \times 0,37 + \\ &+ 0,0965 \times 0,407 = 0,0000037 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Malha 2 } \Delta V &= -0,0965 \times 0,407 + 0,0051 \times 0,30 + \\ &+ 0,3051 \times 0,64 - (-0,3551) \times 0,133 \\ &- 0,1949 \times 1,05 = 0,0000018 \end{aligned}$$

Portanto, depois de determinados os incrementos nas correntes, nós vemos que, dentro da tolerância utilizada nos processos iterativos, a lei das malhas é satisfeita com as novas correntes. Isto significa dizer que, como as novas correntes satisfazem tanto a lei dos nós quanto a lei das malhas, elas são a solução que nós procurávamos, dentro da tolerância fixada.

2.3.2 - Formulação Geral

Dado o sistema da figura 2.5, interessa-nos determinar os valores de $I_1, I_2, I_3, \dots, I_7$ obedecendo às restrições nodais. Estas restrições são:

nó 0	I_1	$+I_2$			$= J_0$	
nó 1			I_5	$+I_7$	$= J_1$	
nó 2				I_6	$-I_7$	$= J_2$
nó 3		$-I_2$	$+I_3$		$-I_6$	$= J_3$
nó 4			I_4	$-I_5$		$= J_4$
nó 5	$-I_1$		$-I_3$	$-I_4$		$= J_5$

Observemos que J_0 é determinado pela especificação das potências nos demais nós do sistema. Este conjunto de restrições é exatamente a lei de Kirchoff dos nós e é mais uma vez escrito como na equação (5).

$$\begin{bmatrix} c \end{bmatrix}^T = \bar{J}$$

Um conjunto de valores que satisfaz às restrições acima é a aproximação inicial

$$I^0 = \{I_1^0, I_2^0, I_3^0, I_4^0, I_5^0, I_6^0, I_7^0\}$$

Como a aproximação inicial não satisfaz à lei das malhas, deve-se calcular os incrementos nas correntes para que as mesmas obedecem às duas leis de Kirchoff. Para o nosso sistema será:

$$\text{Malha 1 } (\Delta I_1 - I_1^0)z_1 + (\Delta I_1 + I_2^0)z_2 + (\Delta I_1 - \Delta I_2 + I_3^0)z_3 = 0$$

$$\begin{aligned} \text{Malha 2 } (\Delta I_2 - \Delta I_1 - I_3^0)z_3 + (\Delta I_2 + I_4^0)z_4 + (\Delta I_2 + I_5^0)z_5 \\ + (\Delta I_2 - I_6^0)z_6 + (\Delta I_2 - I_7^0)z_7 = 0 \end{aligned} \quad \text{ou:}$$

$$\begin{aligned} (z_1 + z_2 + z_3)\Delta I_1 - z_3\Delta I_2 &= I_1^0 z_1 - I_2^0 z_2 - I_3^0 z_3 \\ -z_3\Delta I_1 + (z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)\Delta I_2 &= I_3^0 z_3 - I_4^0 z_4 - I_5^0 z_5 - I_6^0 z_6 - I_7^0 z_7 \end{aligned} \quad (7a)$$

ou:

$$Z_{11} \Delta I_1 + Z_{12} \Delta I_2 = \Delta V_1$$

$$Z_{21} \Delta I_1 + Z_{22} \Delta I_2 = \Delta V_2 \quad \text{ou}$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} \quad (7b)$$

Nesta equação, Z_{kk} é a soma das impedâncias das linhas da malha k . Seu valor é sempre positivo. Z_{km} é a impedância da linha que é comum às malhas k e m . Seu valor é, positivo se a linha for orientada no mesmo sentido com relação às duas ma

lhas, negativo quando a orientação da linha em uma das malhas é oposta à orientação na outra malha e, nulo quando não há linha comum às duas malhas. Os elementos do vetor independente são a soma das diferenças de potencial através de cada elemento da malha. O vetor independente é, portanto, a tensão residual em cada malha devido ao erro cometido na aproximação inicial das correntes nas linhas. Ao determinarmos as correções nas correntes, estas tensões residuais serão nulas. Para a determinação analítica destas tensões residuais escrevamos aqui o termo direito do sistema de equações (7a) :

$$\Delta V_1 = I_1^0 z_1 - I_2^0 z_2 - I_3^0 z_3$$

$$\Delta V_2 = I_3^0 z_3 - I_4^0 z_4 - I_5^0 z_5 + I_6^0 z_6 + I_7^0 z_7 \quad \text{ou:}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & z_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^0 \\ I_2^0 \\ I_3^0 \\ I_4^0 \\ I_5^0 \\ I_6^0 \\ I_7^0 \end{bmatrix}$$

Os coeficientes da matriz agora obtida são a maneira de mostrar como as linhas estão orientadas com relação à orientação da malha em que ela está contida. Se a linha tem a mesma orientação da malha a posição da linha é ocupada com +1, na ma

triz, como é o caso das linhas 2 e 3 na malha 1, e, das linhas 4 e 5 na malha 2. Se a linha tiver orientação contrária à da malha a posição comportará -1 como a linha 1 na malha 1 e as linhas 3, 6 e 7 na malha 2. Se a linha não estiver em uma determinada malha, a sua posição na matriz será ocupada com 0. Esta matriz é denominada matriz de incidência linha-malha. Denominemo-la de L e escrevamos a equação anterior assim:

$$\overline{\Delta V} = - \left[L \right] \overline{V} \quad (7c)$$

onde: $\overline{\Delta V}$ é o vetor das tensões residuais em cada malha, de dimensão $NLOOP \times 1$

$\overline{V} = [Z] \overline{I}^0$ é o vetor das diferenças de potencial nas linhas, já definido na equação 6, de dimensão $NL \times 1$

$[L]$ é a matriz de incidência linha-malha, de dimensão $NLOOP \times NL$

A obtenção de $[L]$ pode ser feita através de algoritmos baseados em topologia da rede ou, a partir da matriz de incidência barra-linha utilizando unicamente operações elementares. O primeiro método oferece maiores dificuldades em virtude de termos que definir o sistema a partir de uma árvore e dos links e formar as malhas através do fechamento um a um de cada link. Este método será por nós relegado. O outro método, que será por nós utilizado devido ao menor esforço computacional requerido, será abordado no item 2.4.1.

Substituindo 7b em 7c unificando a notação teremos:

$$\begin{bmatrix} z_m \end{bmatrix} \overline{\Delta I} = - \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} \overline{V} \quad (7d)$$

Depois de determinarmos os valores de $\overline{\Delta I}$, nesta equação, as correntes nas linhas passarão a ser:

$$I_1 = I_1^0 - \Delta I_1$$

$$I_2 = I_2^0 + \Delta I_1$$

$$I_3 = I_3^0 + \Delta I_1 - \Delta I_2$$

$$I_4 = I_4^0 + \Delta I_2$$

$$I_5 = I_5^0 + \Delta I_2$$

$$I_6 = I_6^0 - \Delta I_2$$

$$I_7 = I_7^0 - \Delta I_2$$

ou :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix}^0 + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \end{bmatrix}$$

$$\overline{I} = \overline{I}^0 + \begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^t \overline{\Delta I} \quad (8)$$

onde $\begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^t$ é a transposta de $\begin{bmatrix} L \end{bmatrix}$

Portanto, o nosso problema consiste em determinar uma distribuição inicial de correntes \overline{I}^0 que satisfaça à lei dos nós e, posteriormente determinar as correções que estas

correntes devem sofrer para que a lei das malhas também seja satisfeita. A primeira parte deste procedimento é descrita pela equação (5) e a segunda parte pela equação (7d). A distribuição final de correntes é determinada pela equação (8).

De posse das correntes em todas as linhas, o fluxo de potência é determinado através de :

$$S_{ij} = E_i i_{ij}^* \quad \text{ou}$$

$$S_\ell = E_i I_\ell^* \quad \text{onde}$$

S é o fluxo em cada linha e

ℓ é a linha que começa em i e termina em j

2.3.3 - Como proceder para inicializar o problema

Na seção anterior nós vimos que o nosso problema consiste em, partindo de uma aproximação inicial T^0 , determinar a distribuição de correntes em um sistema de potência. Esta aproximação inicial T^0 em nossa formulação é análoga à aproximação inicial dada às tensões das barras quando o fluxo de carga é formulado pela análise nodal. Na análise nodal não existe restrição quanto aos valores iniciais das tensões. Na análise de malha nós devemos inicializar o problema com uma distribuição de correntes que satisfaça à lei dos nós em todas as barras. Aqui, nós veremos como proceder para

Inicializar o problema, submetido às restrições nodais.

Consideremos mais uma vez o sistema Ward and Hale e associemos a ele uma árvore, como indica a figura 2.6.

Nesta figura, estão indicados os valores das potências líquidas nas barras. A potência líquida é a diferença entre a potência gerada e a carga. Consideremos inicialmente que as tensões em todas as barras são iguais a 1,0 pu.

Para inicializar o nosso problema escolhemos uma barra i onde $P_i > 0$ e uma barra j onde $P_j < 0$. As barras podem ser, por exemplo, $i = 0$ e $j = 2$ onde $P_0 = 0,85$ e $P_2 = -0,55$. As fontes de corrente associadas a essas barras são $J_0 = 0,85$ e $J_2 = -0,55$ já que $V_0 = V_2 = 1,0$ pu. Agora, através do caminho que liga i a j transportemos uma corrente igual ao mínimo dos valores absolutos entre J_i e J_j . Deste modo as correntes nas linhas 1, 3 e 6 serão $I_1^0 = 0,55$, $I_3^0 = -0,55$ e $I_6^0 = -0,55$, sendo as duas últimas correntes negativas em virtude do caminho ter sentido oposto à orientação da linha. Neste estágio, toda a solicitação da barra 2 foi suprida e ainda existe 0,30 de geração na barra 0. Como P_0 ainda é positiva procuraremos uma barra onde existe solicitação de potência. Ela é a barra 4 onde $P_4 = -0,30 < 0$. Através do caminho que liga a barra 0 à barra 4 será transmitida uma corrente igual a 0,30 que é o mínimo $\{J_0, -J_4\}$. As correntes nas linhas 1, 3 e 6 modificam-se agora para $I_1^0 = 0,85$, $I_3^0 = -0,85$ e $I_6^0 = -0,85$ e as correntes nas linhas 7 e 5 terão valores $I_7^0 = -0,30$ e $I_5^0 = -0,30$. Como agora esgotaram-se a potência disponível na barra 0 e a potência solicitada na barra 4, procuraremos, novamen

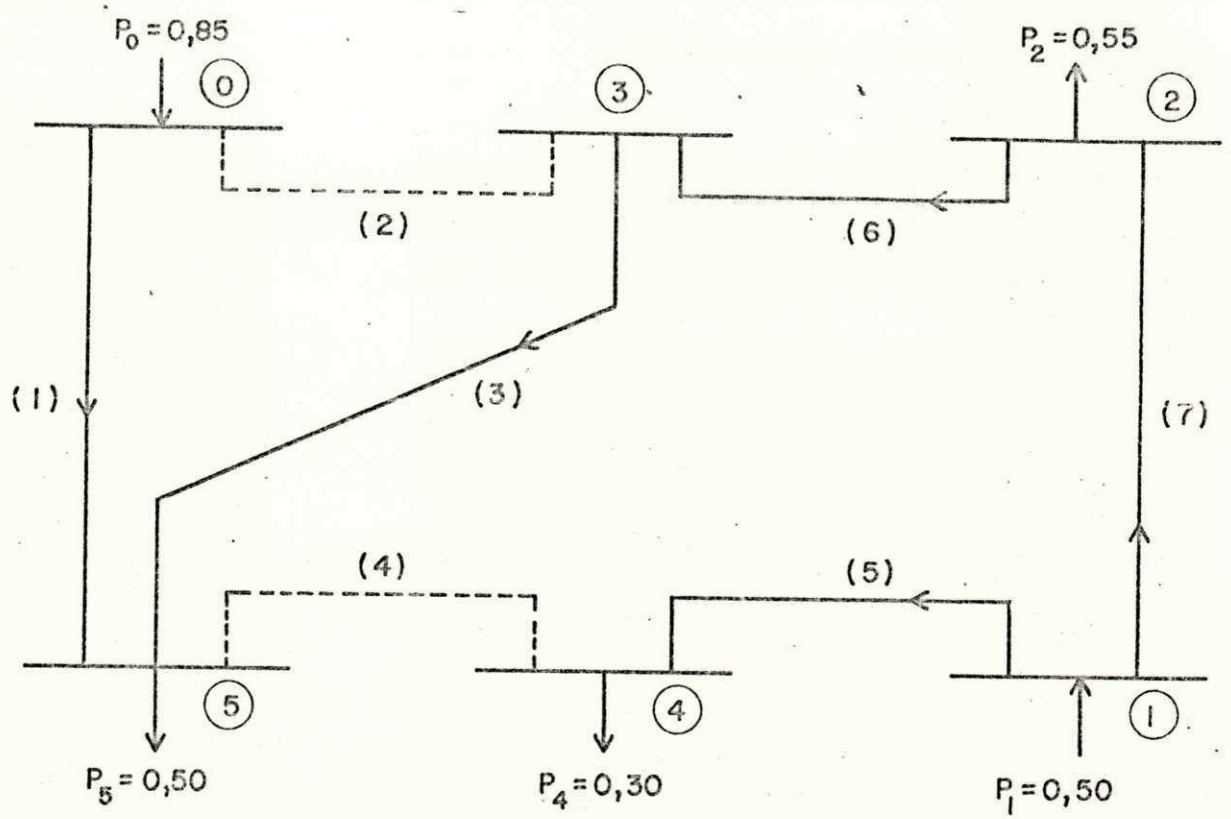


FIGURA 2.6 — UMA ÁRVORE DO SISTEMA WARD AND HALE.
AS LINHAS TRACEJADAS SÃO OS LINKS

te, duas barras tais que $P_i > 0$ e $P_j < 0$. São elas a 1 e a 5 onde $P_1 = 0,50$ e $P_5 = -0,50$. Transmitindo através do caminho que liga a barra 1 a barra 5, uma corrente igual a 0,50, as correntes nas linhas 7, 6 e 3 serão agora $I_7^0 = 0,20$, $I_6^0 = -0,35$ e $I_3^0 = -0,35$. Como a potência disponível e a potência solicitada em todas as barras neste estágio são nulas, está encerrado o processo de inicialização. Observemos que com as correntes iniciais

$$I^0 = \{0,85; 0,0; -0,35; 0,0; 0,30; -0,35; 0,20\}$$

a lei dos nós é obedecida em todas as barras do sistema. Portanto, o procedimento a ser seguido para a inicialização do problema é:

"Escolha duas barras i e j de modo que $P_i > 0$ e $P_j < 0$.

Através do caminho que liga i a j transmitir uma corrente igual ao mínimo de $\{J_i, -J_j\}$

Repetir o processo até que a potência disponível e a potência solicitada em todas as barras sejam nulas."

Como foi visto no decorrer desta seção, os caminhos são sempre escolhidos a partir de uma árvore pré-estabelecida do sistema. A simplicidade na obtenção do caminho sobre a árvore é justificada pelo fato de numa árvore existir um só caminho entre dois pontos.

2.4 - Implementação do método

Consideremos a equação (8),

$$\bar{I} = \bar{I}^0 + [L]^t \bar{\Delta I}$$

que é a solução final do nosso problema pois possibilita de terminar os fluxos de potência a partir dos quais determina mos as tensões e fases nodais. Para que cheguemos à solução final do nosso problema é necessário, portanto, que disponha mos de uma árvore para a distribuição inicial de correntes \bar{I}^0 , da matriz de incidência linha-malha L e da matriz impedân cia de malha Z_m visto que

$$\bar{\Delta I} = - [Z_m]^{-1} L \bar{V}$$

Iniciemos pela obtenção da matriz de incidência li nha-malha que nos levará a obtenção da árvore e, consequente mente, da matriz impedância de malha $[Z_m]$.

2.4.1 - Método para obtenção da matriz $[L]$

Aqui nós nos restringiremos ao mét odo utilizado para obter a matriz de incidência linha-malha a partir de operações elementares na matriz de incidência bar ra-linha.

2.4.1.1 - Justificativa teórica

Como já foi visto anteriormente, as correntes nas linhas e as injeções nodais estão re lacionados através de:

$$[C] \bar{T} = \bar{J}$$

Sabemos também que as correntes de malha e as correntes nas linhas relacionam-se através de :

$$\bar{T}^0 + [L]^t \Delta \bar{T} = \bar{T} \quad (8)$$

Pré-multiplicando por $[C]$ temos :

$$[C] \bar{T}^0 + [C] [L]^t \Delta \bar{T} = [C] \bar{T} \quad (9)$$

As matrizes $[C]$ e $[L]$ podem ser arranjadas de modo que a incidência das N linhas que constituem a árvore seja representada nas primeiras N colunas das matrizes $[C]$ e $[L]$ e que a incidência dos links seja feita nas colunas finais da matriz. Utilizando este procedimento, as matrizes $[C]$ e $[L]$ do nosso exemplo são:

← ARVORE → * → LINK →

$[C] =$

LINHA →	1	3	5	6	7	2	4
BARRA ↓	1	3	5	6	7	2	4
1			1		1		
2				1	-1		
3		1		-1		-1	
4			-1				1
5	-1	-1					-1

← ARVORE → ← LINK →

$$[L] =$$

LINHA →	1	3	5	6	7	2	4
BARRA ↓	1	3	5	6	7	2	4
1	-1	1				1	
2		-1	1	-1	-1		1

Deste modo, as matrizes $[C]$ e $[L]$ podem ser particionadas de modo que cada partição represente a incidência dos elementos da árvore e dos links.

Assim:

$$[C] = \left[\begin{array}{c|c} C_a & C_l \end{array} \right] \quad (10)$$

e

$$[L] = \left[\begin{array}{c|c} L_a & L_l \end{array} \right] \quad (11)$$

Como toda malha tem a orientação do seu link, $L_l = U$, onde U é a matriz identidade.

Assim, a equação 9 transforma-se em:

$$[C] \bar{T}^0 + \left[\begin{array}{c|c} C_a & C_l \end{array} \right] \left[\begin{array}{c|c} L_a & U \end{array} \right]^t \bar{\Delta T} = [C] \bar{T} \quad (12)$$

Da equação 5 sabemos que $[C] \bar{T} = \bar{J}$, sendo \bar{T} o vetor de injeções de correntes nodais. Como as injeções nodais não se modificam $[C] \bar{T}^0 = \bar{J}$, o que transforma a equação 12 em:

$$\left[\begin{array}{c|c} C_a & C_l \end{array} \right] \left[\begin{array}{c|c} L_a & U \end{array} \right]^t \bar{\Delta T} = 0 \quad \text{ou}$$

$$\left[\begin{array}{c|c} C_a & C_l \end{array} \right] \left[\begin{array}{c|c} L_a & U \end{array} \right]^t = 0 \quad \therefore$$

$$\begin{aligned}
[C_a][L_a]^t + [C_\ell][U] &= 0 \quad \dots \\
[C_a][L_a]^t &= -[C_\ell] \quad \dots \\
[L_a]^t &= -[C_a]^{-1}[C_\ell] \quad (13)
\end{aligned}$$

Portanto, a equação 13 nos leva a concluir que a matriz de incidência linha-malha pode ser obtida da matriz de incidência barra-linha através de operações elementares.

2.4.1.2 - Obtenção de $[L]$ a partir de $[C]$

No parágrafo anterior nós vimos que a matriz de incidência linha-malha pode ser obtida da matriz de incidência barra-linha através de operações elementares. Aqui, nós veremos a que operações $[C]$ deve submeter-se para transformar-se em $[L]$.

Da equação 13 sabemos que :

$$[C] = [C_a \mid C_\ell]$$

Pré-multiplicando por $[C_a]^{-1}$

temos :

$$-[C_a]^{-1}[C] = -[C_a]^{-1}[C_a \mid C_\ell] \quad \text{ou:}$$

$$-[C_a]^{-1}[C] = -\left[[C_a]^{-1}[C_a] \mid [C_a]^{-1}[C_\ell] \right] \quad \text{ou:}$$

$$- \begin{bmatrix} C_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U & L_a^t \end{bmatrix}$$

Isto é, se operarmos com a matriz $\begin{bmatrix} C \end{bmatrix}$ de maneira a obter a matriz unitária negativa na partição que representa a incidência dos elementos da árvore, a matriz de incidência linha-malha será obtida em lugar da partição de $\begin{bmatrix} C \end{bmatrix}$ que representa a incidência dos links. Portanto, as operações que $\begin{bmatrix} C \end{bmatrix}$ deve sofrer para transformar-se em $\begin{bmatrix} L \end{bmatrix}$ são:

1. Tornar-se diagonal superior
2. Tornar-se escalonada negativamente (todos os elementos da diagonal devem ser -1)
3. Tornar-se na matriz unitária negativa.

Para que a matriz de incidência barra-linha do parágrafo anterior se tornasse diagonal superior foram necessárias as seguintes operações:

1. Permutaram-se as linhas 1 e 5 da matriz
2. Permutaram-se as linhas 2 e 3 da matriz
3. Permutaram-se as linhas 3

e 4 da matriz

4. Somou-se a linha 3 da matriz à linha 5 da matriz.

A matriz resultante das operações anteriores é :

$$[C] = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -1 & -1 & & & & -1 \\ \hline & 1 & & -1 & & -1 \\ \hline & & -1 & & & 1 \\ \hline & & & 1 & -1 & \\ \hline & & & & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Para se obter esta matriz na forma escalonada negativa faz-se necessário unicamente a multiplicação das linhas 2, 4 e 5 por -1, resultando em:

$$[C] = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -1 & -1 & & & & -1 \\ \hline & -1 & & 1 & & 1 \\ \hline & & -1 & & & 1 \\ \hline & & & -1 & 1 & \\ \hline & & & & -1 & -1 \\ \hline \end{array} \quad (14)$$

O passo final do processo é realizado com as operações:

1. Soma-se a linha 5 da matriz

triz à linha 4 da matriz.

2. Soma-se a linha 4 da matriz à linha 2 da matriz.

3. Multiplica-se a linha 2 da matriz por -1 e o resultado é somado à linha 1 da matriz, obtendo-se como resultado:

-1					-1	
	-1				1	-1
		-1				1
			-1			-1
				-1		-1

$$= \begin{bmatrix} -U \\ L_a^t \end{bmatrix}$$

ou :

$$\begin{bmatrix} L_a \end{bmatrix} =$$

LINHA →	1	3	5	6	7
MALHA ↓					
1	-1	1			
2		-1	1	-1	-1

Como os links sempre incidem positivamente em suas malhas não é necessário obter-se a matriz de incidência linha-malha completa. Neste ponto, convém observar que as operações realizadas na matriz $[C]$ para deixá-la na forma 14 são escolhidas aleatoriamente. Não existin

do uma sequência lógica de operações pode-se necessitar de um número de operações muito grande até obter a matriz na forma desejada.

2.4.1.3 - Um esquema de renumeração de barras e linhas.

Uma sequência lógica de operações para a obtenção da matriz de incidência linha-malha seria possível se a matriz $[C]$ já fosse obtida originalmente na forma 14. Assim, já sendo a matriz escalonada negativamente, necessitamos unicamente de realizar somas de linhas da matriz para obter a matriz unitária negativa.

Para que a matriz de incidência já seja obtida nesta forma é necessário que em toda linha da matriz exista um -1 e que este -1 ocorra na diagonal. Um esquema da renumeração que cumpra estes objetivos é dado no algoritmo a seguir:

1. Renumerar sequencialmente todas as barras do sistema a partir da referência.
2. Atribuir a cada linha do sistema renumeração idêntica à de sua extremidade renumerada. As linhas restantes, os links, são renumerados a partir do

número de barras.

A aplicação deste algoritmo na renumeração do sistema da figura 2.6 é mostrada na figura 2.7.

Da figura 2.7 nós podemos observar que com a renumeração alguns ramos podem mudar de polaridade e que os links podem deixar de ser os iniciais.

A nova matriz de incidência barra-linha é :

LINHA →	1	2	3	4	5	6	7
BARRA ↓							
1	-1		1			1	
2		-1		1		-1	
3			-1		1		
4				-1			1
5					-1		-1

Para se obter a matriz unitária negativa na partição da matriz correspondente à árvore é necessário:

Somar a linha 5 da matriz à linha 3

Somar a linha 4 da matriz à linha 2

Somar a linha 3 da matriz à linha 1

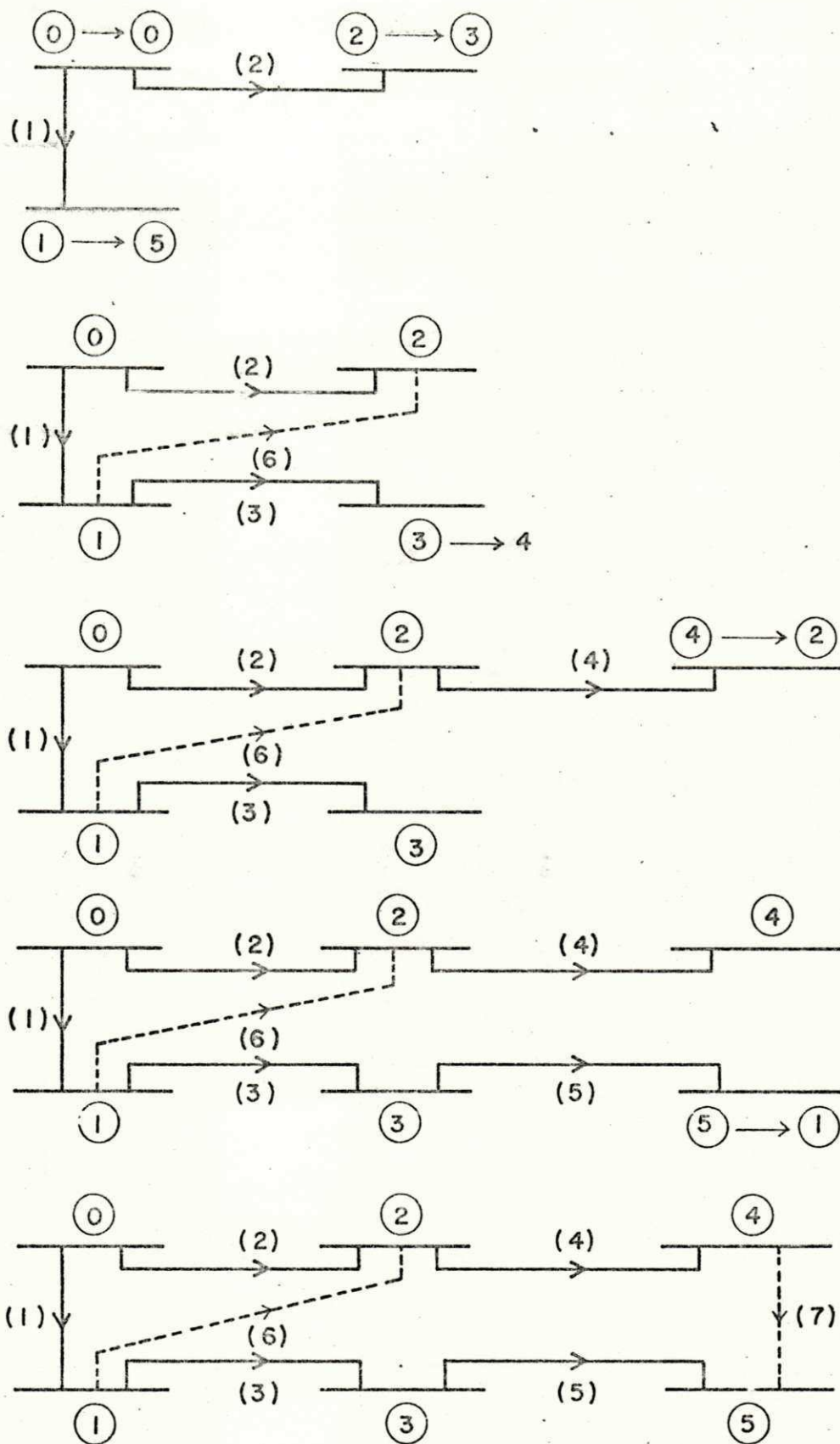


FIGURA 2.7 — ESQUEMA DE RENUMERAÇÃO DE BARRAS E LINHAS

obtendo-se como resultado:

	1	2	3	4	5	6	7
1	-1					1	-1
2		-1				-1	1
3			-1				-1
4				-1			1
5					-1		-1

Como já sabemos, na partição da matriz correspondente aos links obtém-se a matriz incidência linha-malha, a menos dos links. Assim, nas linhas 6 e 7 da matriz anterior estão as linhas que pertencam às malhas 1 (linhas 1 e 2) e 2 (linhas 1, 2, 3, 4 e 5).

A implementação do algoritmo de renumeração de linhas e barras é feita através do fluxograma da figura 2.8.

Este fluxograma, convenientemente utilizado, pode ser aplicado para determinação do caminho entre dois pontos de uma árvore ou de um grafo. A tabela a que se refere o bloco 1 do fluxograma da figura 2.8 é mostrada a seguir para o sistema da figura 2.6.

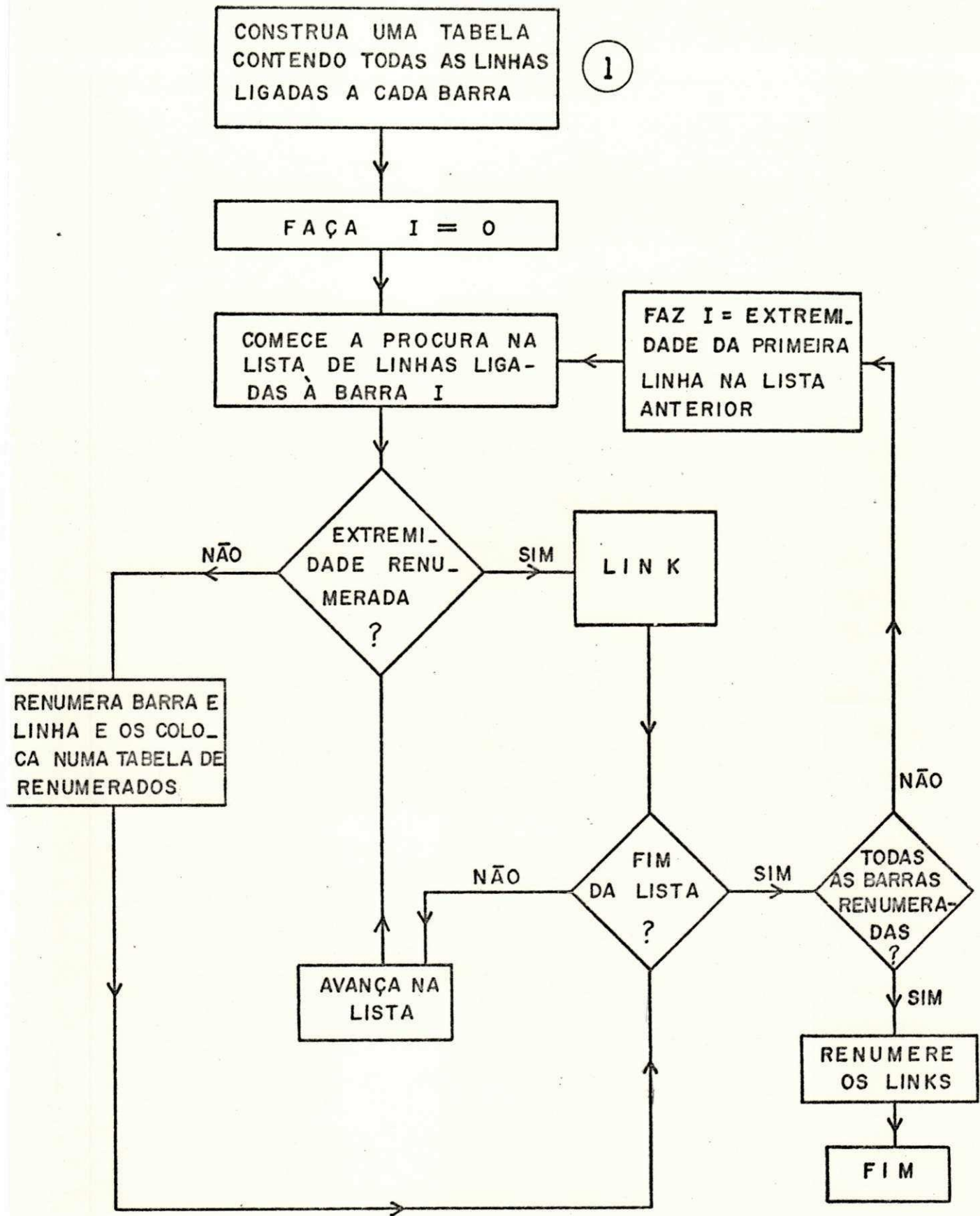


FIGURA 2.8 — FLUXOGRAMA UTILIZADO PARA RENUMERAÇÃO DE BARRAS E LINHAS.

	LISP		KLISP
1	1	0	1
2	2		
3	5	1	3
4	7		
5	6	2	5
6	7		
7	2	3	7
8	3		
9	6	4	10
10	4		
11	5	5	12
12	1		
13	3		
14	4		

No vetor LISP estão armazenadas por blocos as linhas que são ligadas a determinada barra e o vetor KLISP aponta em que posição do vetor LISP começa o bloco de linhas ligadas àquela barra. Por exemplo, no vetor KLISP está dito que o bloco de linhas ligado à barra 1 começa na posição 3 do vetor LISP e, que o bloco de linhas ligado à barra 2 começa na posição 5 do vetor LISP. Portanto, o bloco de ramos ligado à barra 1 está entre as posições 3 e 4 do vetor LISP.

2.4.2 - Obtenção da matriz de impedância de malha.

Conhecida a matriz de incidência ra

mo-malha, a obtenção da matriz de impedância de malha é evidente pois, a matriz de incidência mostra as linhas que pertencem a uma determinada malha, as linhas que pertencem a mais de uma malha e como as linhas estão orientadas em cada malha. Portanto, os elementos da matriz de impedância de malha são obtidas das relações:

$$Z(k, k) = \sum_{l \in k} z(l)$$

$$Z(k, m) = \sum_{l \in (k \cap m)} L(l, k) L(l, m) z(l)$$

onde L é a incidência do ramo l na malha k

2.5 - Aplicação da análise de malha ao fluxo de carga DC.

Um fluxo de carga DC é uma das muitas maneiras simplificadas de determinar fluxo de potência ativa nas linhas e a fase da tensão nas barras de um sistema de potência. Num fluxo de carga DC admite-se, em geral, que a resistência e a capacitância paralela das linhas de transmissão são nulas. Além disso, admite-se que a tensão em todas as barras é mantida constante e num valor igual a 1,0 p.u.. Este método de análise é bastante empregado em planejamento a longo prazo onde a incerteza nos dados não justifica métodos com grande precisão. É também bastante útil para inicializar os métodos precisos de fluxo de carga a partir de um ponto mais próximo da

solução, com o objetivo de acelerar a convergência.

A equação que dá o fluxo de potência ativa entre duas barras de um sistema de potência é:

$$f_{ij} = \frac{V_i V_j \cdot x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_j) + \frac{V_i (V_i - V_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \cdot r_{ij} +$$

$$+ \frac{2V_i V_j \cdot r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \cdot \operatorname{sen}^2(\theta_i - \theta_j)/2 \quad (9)$$

Aplicando as hipóteses do fluxo de carga DC à equação 9 teremos:

$$f_{ij} = \frac{\operatorname{sen}(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}$$

Chamando f_{ij} de F_ℓ e x_{ij} de X_ℓ , onde ℓ é a linha que começa em i e termina em j teremos:

$$F_\ell = \frac{\operatorname{sen}(\theta_i - \theta_j)}{X_\ell} \quad (9a)$$

Normalmente, nos fluxos de carga DC, aproxima-se $\operatorname{sen}(\theta_i - \theta_j)$ por $(\theta_i - \theta_j)$ para se obter um sistema de equações lineares em θ , visto que o processo iterativo é feito com a variável θ . Aplicando-se a análise de malha ao fluxo de carga DC, o processo iterativo é feito com os fluxos de potência nas linhas, pois sendo todas as tensões iguais a 1,0 pu, corrente e fluxo

de potência são numericamente iguais. Deste modo, obtém-se um sistema de equações lineares sem que seja necessário aproximar $\sin \theta$ por $\underline{\theta}$. Portanto, ao determinarmos os fluxos de potência através das equações

$$[Z_m] \overline{\Delta F} = - [L] \overline{V} \quad e$$

$$\overline{F} = \overline{F}^0 + [L]^t \overline{\Delta F}$$

nós nos utilizamos da equação 9a para determinar as fases nodais. Todas as fases nodais são determinadas caminhando-se sobre uma árvore do sistema.

Assim:

$$\theta_j = \theta_i - \text{sen}^{-1} (X_{\ell} \cdot F_{\ell}) \quad (9b)$$

Nesta equação, a reatância e o fluxo estão em p.u. e, consequentemente, a fase está em radianos.

CAPÍTULO III

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Neste capítulo nós damos uma visão geral do programa elaborado para fazer o estudo de Fluxo de Carga pela análise de malha e mostramos os resultados através dele obtidos. Os resultados são mostrados em paralelo com aqueles obtidos através da utilização do programa de Fluxo de Carga da Philadelphia Electrical Company (PECO) em suas versões AC e Simplificada com o objetivo de testar a precisão dos resultados obtidos com a análise de malha. Além da apresentação dos resultados nós fazemos uma comparação qualitativa da exigência de memória e do tempo de processamento quando utilizada a análise de malha e o programa da PECO.

3.1 - O Programa

O programa por nós elaborado para o estudo de Fluxo de Carga pela análise de malha é constituído de cinco partes.

A primeira parte é o programa principal onde se faz a entrada de dados das barras e das linhas do sistema. Os dados de barra são a sua identificação e as potências gerada e consumida em MW. As barras podem ser numeradas até 1500 e não é necessário que o sejam sequencialmente. Os dados de linha são a identificação do seu início e seu fim e a sua impedância, que deve ser expressa em percentagem. Tanto os dados de barra quanto os dados de linha tem entrada idêntica ao do fluxo de carga da PECO, terminando a lista de dados quando se encontra 9999 nas colunas de 1 a 4. A folha de codificação para entrada dos dados acima é apresentada em anexo. A saída dos resultados também é feita no programa principal e consta dos fluxos nas linhas, em MW, e das fases nodais.

Na segunda parte do programa, denominada de subrotina ORDENA, é onde se faz a ordenação das barras, de modo que elas sejam numeradas sequencialmente e ainda para que cada barra fique ligada, através de uma linha, a pelo menos uma barra com numeração inferior à sua, com exceção da barra de referência.

Na subrotina INCID nós formamos a matriz de incidência barra-linha e a partir dela, como foi dito no capítulo

anterior, nós obtemos a matriz de incidência linha-malha. . Estas duas matrizes são armazenadas compactamente.

A matriz de incidência linha-malha nos dá as malhas do sistema e conseqüentemente a árvore. Como nesta subrotina nós obtemos a incidência linha-malha, nela nós determinamos a matriz impedância de malha.

A quarta parte do programa é a subrotina FLUPIN . Nesta subrotina encontramos a solução inicial do problema, isto é, determinamos a corrente inicial nas linhas de modo a que se satisfaça a lei de Kirchoff em todos os nós. Esta distribuição inicial de correntes é feita sobre a árvore do sistema encontrada na subrotina INCID.

O último estágio do programa é a subrotina ITERA. Nesta subrotina determinamos inicialmente o vetor constante da equação $[A]\bar{X} = B$. Este vetor é o resíduo de tensão nas malhas devido ao fato de a distribuição inicial de correntes não satisfazer à lei das malhas. Em seguida, resolvemos a equação $[A]\bar{X} = \bar{B}$ para que determinemos os incrementos a serem dados nas correntes nas linhas a fim de que se satisfaça a lei das malhas. Devido às características das equação que descrevem o sistema, escolheu-se o método de Gauss-Seidel para a resolução das equações. A tolerância especificada foi de 10^{-4} . Depois da obtenção dos incrementos a serem dados nas correntes nas linhas, nós reavaliamos as correntes nas linhas, para que agora satisfaçam à lei das malhas. Como as correntes nas linhas obedecem à lei das malhas e à lei dos nós, elas são a solução do problema. Neste ponto, nós determinamos as fases

nodais a partir de uma determinada barra de referência. A obtenção das fases nodais é feita caminhando-se, mais uma vez, sobre a árvore encontrada na subrotina IN
CID.

Na figura 3.1 nós mostramos um diagrama que apresenta de maneira sucinta os diversos blocos do programa e suas funções.

3.2 - Os resultados

O programa foi testado com três sistemas de potência de diferentes características.

O primeiro, um sistema-teste constituído de 6 barras e 7 linhas onde a mínima relação $X/R = 1,45$ e a máxima relação $X/R = 4,65$. A topologia e as características do sistema - teste são apresentadas na figura 3.2, e tabelas 3.1 e 3.2 respectivamente.

Os resultados obtidos para este sistema utilizando-se o método da análise de malha e o programa de fluxo de carga da PECO são mostrados a seguir.

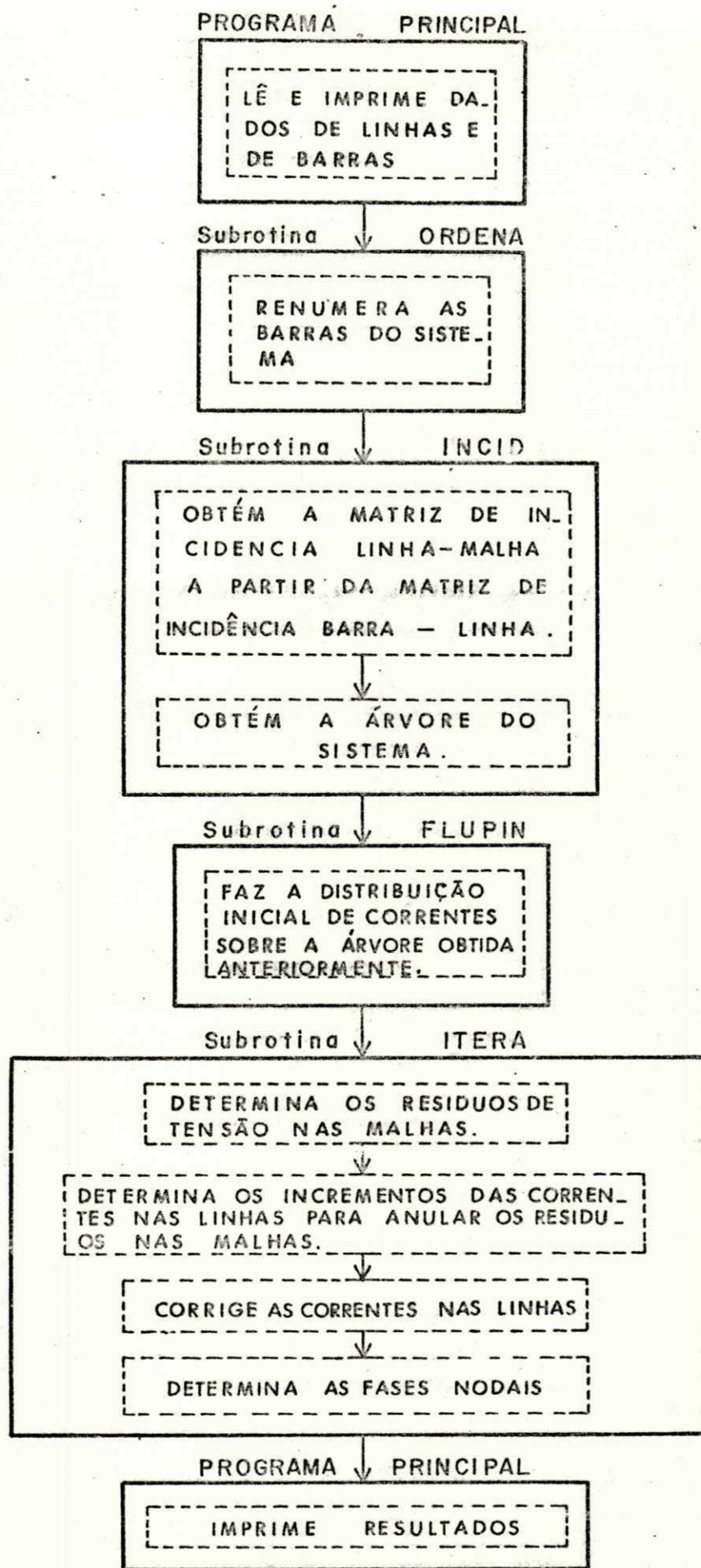


FIGURA 3.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DAS ETAPAS DO PROGRAMA.

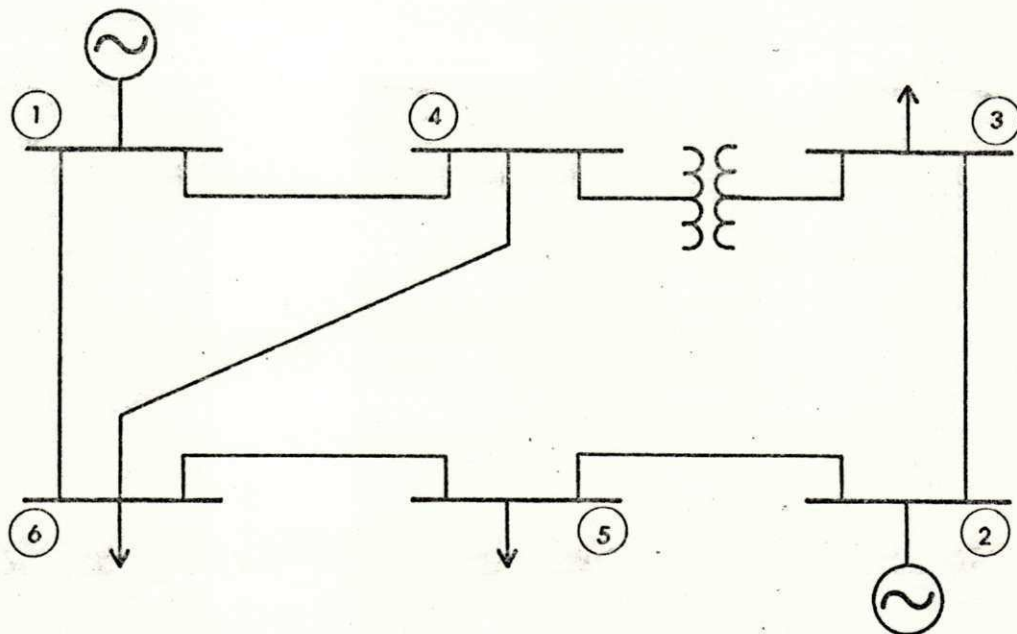


FIGURA 3.2 - TOPOLOGIA DO SISTEMA TESTE.

LINHA	R (%)	X (%)	B (%)
1 - 4	8,0	37,0	0,0
1 - 6	12,3	51,8	0,0
2 - 3	72,3	105,0	0,0
2 - 5	28,2	64,0	0,0
4 - 3	0,0	13,3	0,0
4 - 6	9,7	40,7	0,0
6 - 5	0,0	30,0	0,0

TABELA 3.1 - DADOS DE LINHAS E TRANSFORMADORES.

BARRA	TIPO	PG (MW)	QG(MVAR)	PC (MW)	QC(MVAR)
1	Vθ *	—	—	0,0	0,0
2	PQ ***	50,0	0,0	0,0	0,0
3	PV ***	0,0	—	55,0	13,0
4	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
5	PQ	0,0	0,0	30,0	18,0
6	PQ	0,0	0,0	50,0	5,0

TABELA 3.2 - DADOS DE BARRA.

LINHA ij	<1> P_{ij} (MW)	<2> P_{ij} (MW)	<3> P_{ij} (MW)
1-4	47,1	47,7	48,3
1-6	44,7	45,3	44,7
2-3	24,7	24,8	24,0
2-5	25,3	25,2	26,0
4-3	33,0	32,3	32,9
4-6	14,1	13,1	13,6
6-5	6,2	6,4	5,7

Observamos do quadro acima que os resultados obtidos não são significativamente diferentes com o uso de qualquer um dos métodos de resolução.

O segundo sistema para o qual foram obtidos resultados com o nosso programa foi aquele apresentado na referência 9 (Simplified load flow de J. E. Bonaparte). O referido sistema é constituído de 30 linhas e 21 barras tendo a relação X/R variado entre 2,0 e 8,0. Na figura 3.3 nós apresentamos o diagrama unifilar deste sistema e nas tabelas 3.3 e 3.4 suas características.

A seguir, apresentamos os resultados conseguidos para este sistema utilizando os métodos de análise a que nos referimos anteriormente.

LINHA i_j	<1> P_{ij} (MW)	<2> P_{ij} (MW)	<3> P_{ij} (MW)
1- 6	162,0	164,7	163,7
1- 7	169,0	171,4	173,0
1-10	145,9	147,8	148,0
2- 4	18,9	19,0	20,9
3- 2	36,9	37,0	38,7
5- 2	4,6	4,6	4,8
5-12	1,7	1,7	1,5
6-13	34,5	34,7	32,4
6-20	77,5	78,1	79,4
7-10	1,6	1,3	-0,3
7-19	167,5	169,2	172,4
8- 3	74,9	75,5	77,4
8-18	52,6	53,1	54,5
9- 2	11,5	11,6	11,7
9- 5	6,2	6,3	6,3
9-12	30,6	30,8	30,1
10-15	67,5	68,4	67,0
11- 4	21,9	21,9	20,7
13-21	102,0	102,6	98,9
14- 9	10,9	11,0	9,2
14-12	11,1	11,2	9,3
14-17	20,0	20,1	20,1
15-13	67,5	68,3	66,9
16- 4	14,2	14,0	13,5
16-12	6,2	6,5	9,6
18-11	101,9	102,0	100,8
18-16	60,8	60,6	63,1
19- 8	167,5	168,7	171,8
20- 9	77,5	77,7	78,9
21-14	102,0	102,4	98,7

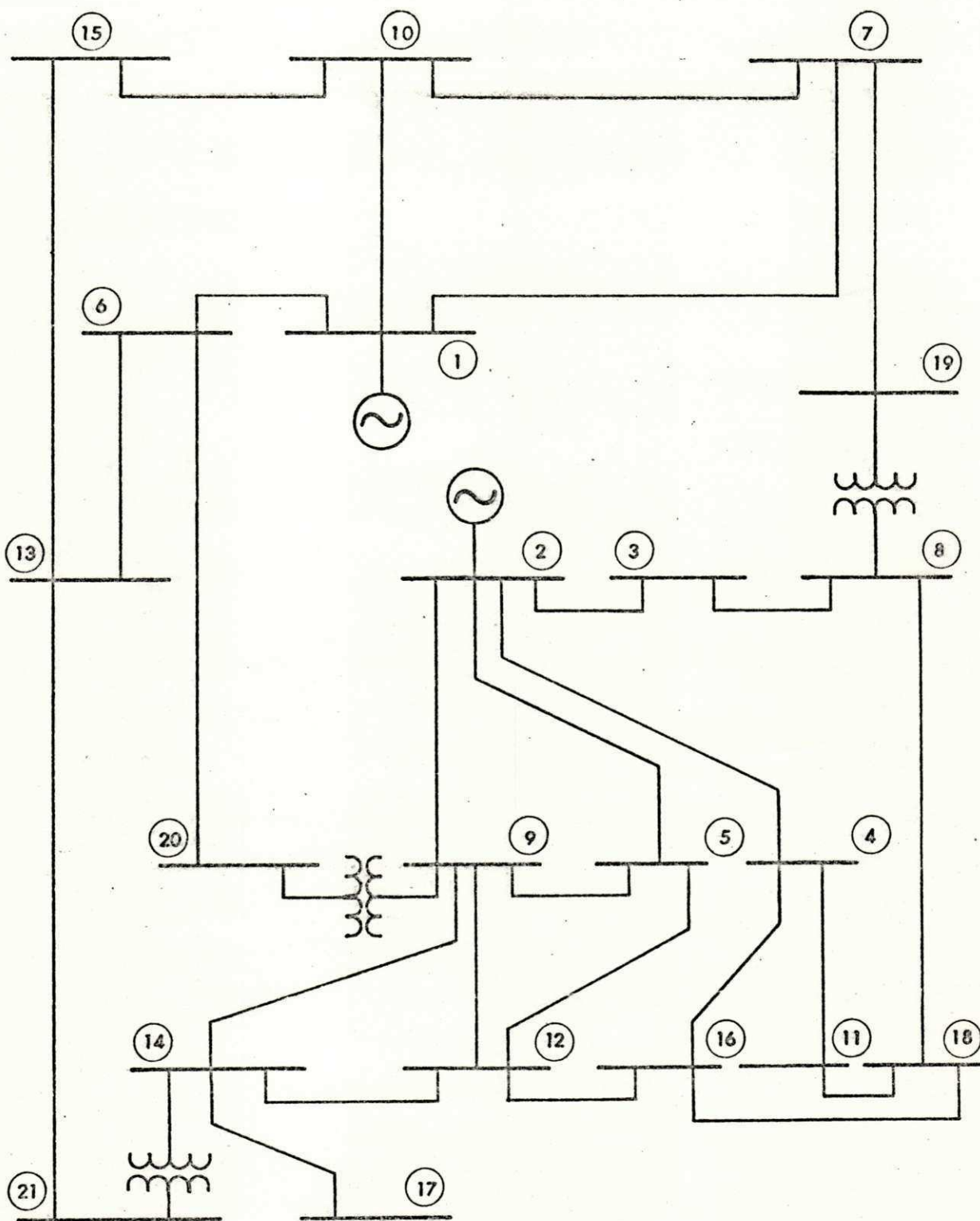


FIGURA 3.3 - SISTEMA DE POTÊNCIA DA REFERÊNCIA 9.

TABELA 3.3 - DADOS DE LINHA DO SISTEMA DA FIGURA 3.3

Linha	R(%)	X(%)	B(%)
1- 6	0,7	4,8	j5,3
1- 7	0,3	1,8	j2,0
1-10	0,3	2,1	j2,3
2- 4	0,1	0,2	j1,0
3- 2	0,7	2,7	j3,7
5- 2	1,6	6,0	j0,1
5-12	4,7	11,8	j0,2
6-13	0,2	1,6	j1,7
6-20	0,7	4,5	j5,3
7-10	0,2	1,4	j0,4
7-19	0,2	1,4	j0,3
8- 3	1,0	3,8	j0,3
8-18	1,9	6,8	j7,5
9- 2	2,4	8,9	j0,7
9- 5	3,2	12,1	j0,2
9-12	0,8	3,1	j0,2
10-15	0,3	2,2	j2,4
11- 4	0,1	0,4	j0,6
13-21	0,2	1,5	j1,6
14- 9	2,1	5,2	j0,3
14-12	5,4	13,6	j0,2
14-17	2,4	6,0	j0,1
15-13	0,9	5,6	j1,6
16- 4	0,3	1,0	j10,3
16-12	0,2	0,5	j5,4
18-11	0,1	0,2	j0,4
18-16	0,1	0,3	j10,5
19- 8	0,0	3,4	j0,0
20- 9	0,0	3,4	j0,0
21-14	0,0	3,4	j0,0

TABELA 3.4 - DADOS DE BARRA DO SISTEMA DA FIGURA 3.3

BARRA	TIPO	PG (MW)	QG (MVAR)	PC (MW)	QC (MVAR)
1	Vθ*	-	-	265,0	120,0
2	PV***	26,0	-	60,0	19,0
3	PQ**	0,0	0,0	38,0	14,0
4	PQ	0,0	0,0	55,0	22,0
5	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
6	PQ	0,0	0,0	50,0	20,0
7	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
8	PQ	0,0	0,0	40,0	19,0
9	PQ	0,0	0,0	40,0	19,0
10	PQ	0,0	0,0	80,0	38,0
11	PQ	0,0	0,0	80,0	38,0
12	PQ	0,0	0,0	50,0	24,0
13	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
14	PQ	0,0	0,0	60,0	29,0
15	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
16	PQ	0,0	0,0	40,0	19,0
17	PQ	0,0	0,0	20,0	10,0
18	PV	190,0	-	80,0	20,0
19	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
20	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0
21	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0

De uma observação dos resultados agora expostos, concluímos mais uma vez que os valores obtidos com a utilização de qualquer uma das técnicas são bastante semelhantes.

O último sistema a ser testado no nosso estudo foi o sistema CHESF-ELETRONORTE previsto para o ano de 1985. Este é um sistema constituído de 249 barras e 268 linhas operando predominantemente nos níveis de tensão 69, 138, 230 e 500 KV. Neste sistema a mínima relação X/R é de 2,90 e a máxima é 15,0. Em virtude da quantidade de dados que viríamos a listar devido ao porte do sistema, tomamos aqui a liberdade de omitir as características deste sistema.

Para efeito de análise apresentamos somente os resultados obtidos em linhas e transformadores que transmitem potências superiores a 70% de seu limite térmico. O limite térmico das linhas foi obtido a partir da figura 3.4, extraída da referência 10. A seguir, apresentamos os resultados obtidos.

Linha ij	$P_{ij}^{<1>}$ (MW)	$P_{ij}^{<2>}$ (MW)	$P_{ij}^{<3>}$ (MW)
200-221	139,5	142,1	145,8
200-240	170,1	173,5	171,3
200-271	128,0	127,9	126,1
200-500	354,7	366,9	364,4
202-203	129,3	131,3	132,5

225-625	97,9	93,3	93,3
228-628	37,5	35,8	35,8
231-238	129,2	127,8	127,5
232-332	49,9	47,6	47,6
238-538	258,4	255,7	255,1
239-539	188,1	187,1	186,5
240-242	147,7	144,1	144,0
240-540	186,2	186,2	182,2
240-640	73,5	70,0	70,0
241,247	168,6	167,3	167,5
241-250	156,5	150,4	150,6
241-541	445,4	432,5	436,2
242-642	81,2	77,4	77,4
250-650	78,2	74,5	74,5
254-654	84,0	80,0	80,0
270-272	111,3	108,5	108,3
274-277	125,7	120,8	122,3
274-278	193,4	185,4	186,7
274-279	186,8	178,8	179,9
274-574	509,3	489,8	492,3
278-278	71,8	68,4	70,2
298-598	474,1	451,5	451,5
500-505	880,4	891,3	895,0
500-540	761,5	764,9	767,6
500-582	763,9	757,0	760,3
540-541	668,1	656,9	662,4
574-582	763,9	742,9	746,7
597-598	474,1	456,6	457,2

3.3 - Análise dos resultados

3.3.1 - Precisão

Com base nos resultados obtidos a través da utilização de três métodos distintos , faremos a análise da precisão obtida ao utilizarmos a análise de malha, tomando como base o Fluxo de Carga AC da PECO.

Nos dois primeiros casos nós não dispusemos de dados referentes ao comprimento das linhas (variável que determina o limite térmico) e do nível da tensão de transmissão. Considerando, no entanto, a relação X/R dos dois sistemas nós admitiremos que a tensão de transmissão no primeiro caso é 138 KV e no segundo 230 KV. Como critério para análise, nós adotamos como capacidade das linhas um limite igual a 150 % do seu SIL, em virtude de não podermos avaliar o limite término de cada uma delas. Isto corresponde a considerar na análise, linhas com comprimentos até 270 Km. No primeiro caso o SIL é 47 MW e no segundo é 132 MW.

No primeiro dos casos estudados somente duas linhas transmitem potências aproximadas do limite fixado para análise (70% de 1,5 SIL). Nestas linhas o máximo erro cometido foi de 2,5 % utilizando-se a análise de malha e 1,3% ao utilizar-se o Fluxo de Carga Simplificado, estando todos os erros relacionados ao Fluxo de Carga AC da PECO.

Vemos que neste caso os resultata

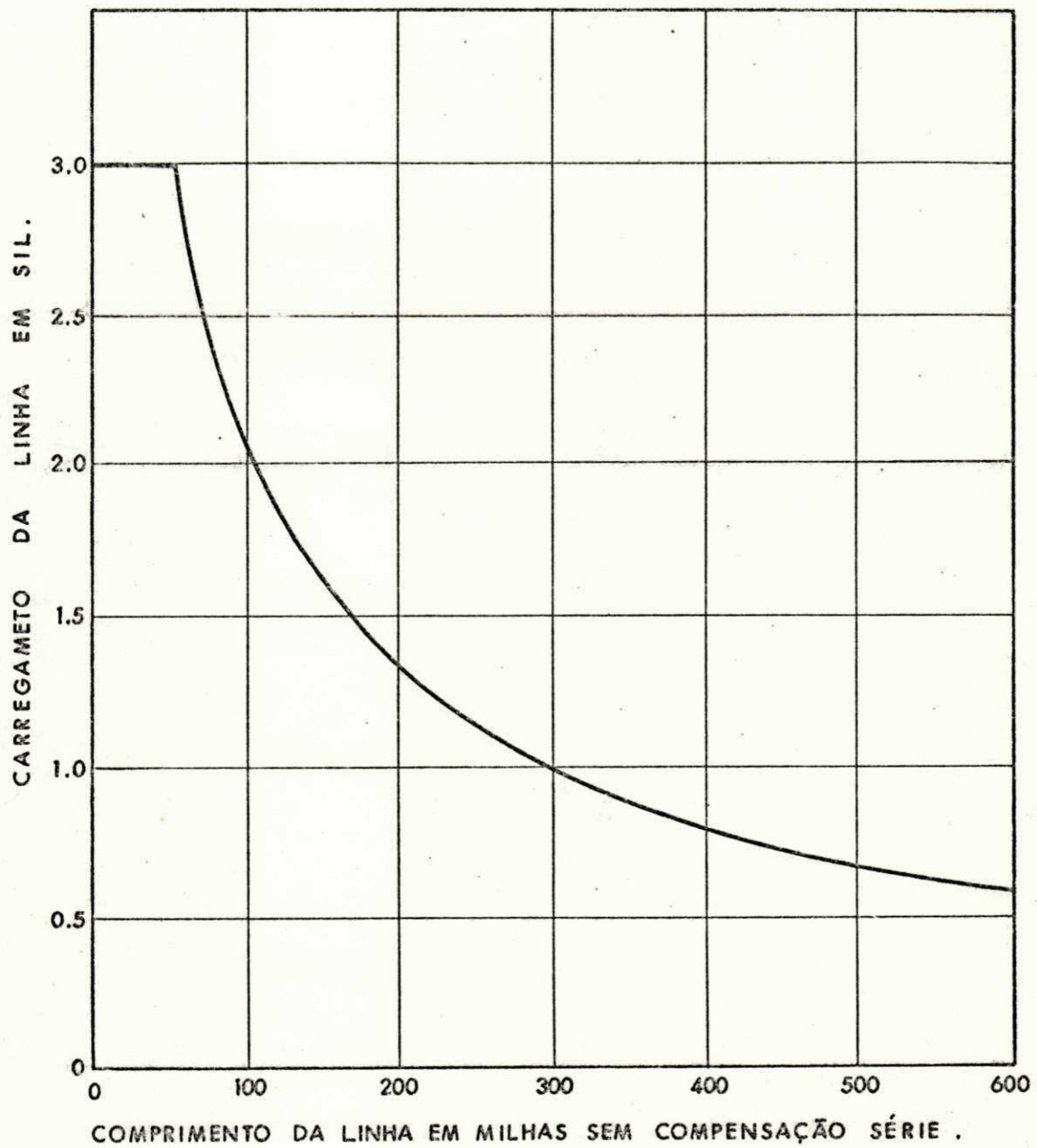


FIGURA 3.4 - CAPACIDADE DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO EM FUNÇÃO DA CARGA DA IMPEDANCIA DE SURTO (SIL)

dos obtidos com a utilização dos três métodos são idênticos do ponto de vista de precisão, já que o fluxo de carga DC é empregado predominantemente em estudos de Planejamento, onde a previsão de carga é feita com uma incerteza de até 30%. Nas demais linhas, que não estão dentro da faixa de análise, o máximo erro cometido foi de 8,8% quando utilizada a análise de malha e 12,3% ao utilizar-se o Fluxo de Carga Simplificado, tendo a ocorrência sido verificada numa linha que transmite 5,7MW que representa quase 12% do limite fixado para análise. Apesar de este resultado não ser passível de análise, mesmo assim, ele poderia ser confiável para efeito de Planejamento. Nos casos intermediários, o máximo erro foi de 3,7% em ambos os casos, podendo-se concluir o mesmo que antes.

No segundo caso, para as linhas situadas dentro da faixa fixada para análise, o máximo erro cometido ao utilizar-se a análise de malha foi 3,3% e 3,7% quando da utilização do Fluxo de Carga Simplificado. Estes resultados nos mostram mais uma vez que os resultados obtidos nos três casos são idênticos quando analisados à luz da incerteza dos dados de entrada.

No terceiro caso testado nós determinamos a capacidade das linhas utilizando-nos do gráfico apresentado na figura 3.4 e a capacidade dos transformadores foi retirada do banco de dados da CHESF. Como foi dito anteriormente, os resultados analisados são aqueles obtidos para linhas ou transformadores que transmitem mais de 70% do seu limite térmico. Para as linhas e transformadores que se encontram nesta situação, os resultados expostos na última tabela do parágrafo anterior

nos mostram que a aplicação da Análise de Malha resulta na obtenção de erros variando na faixa de 0,7 a 5,0% enquanto que o Fluxo de Carga Simplificado nos dá uma faixa de erro de 0,0 a 2,6%. Do mesmo modo que antes, a conclusão é de que os resultados obtidos com os três métodos de análise podem ser utilizados indistintamente, quando observados sob o ponto de vista da precisão para uma dada aplicação, no caso, o Planejamento.

3.3.2 - Velocidade/Memória

Vejamos agora qual o desempenho da análise de malha no estudo de fluxo de carga quando aplicado a sistemas de diferentes características.

Para o primeiro sistema em consideração, o tempo gasto na solução foi:

0,09 s Utilizando-se Análise de Malha.

0,51 s Utilizando-se o Fluxo de Carga Simplificado.

0,96 s Utilizando-se o Fluxo de Carga AC da PECO.

No segundo caso, tivemos 3,61s, 0,95s e 1,72s considerando a mesma ordem de métodos utilizada no primeiro caso.

Os resultados obtidos para o último sistema abordado foram 2,20s, 4,82s e 19,54s também considerando a mesma ordem de métodos do primeiro caso. O computador utilizado foi o IBM 370/145.

No primeiro e no último caso obteve-se melhor desempenho ao utilizar-se a Análise de Malhas do que os outros dois métodos, enquanto que no segundo caso o emprego da análise de malha é desvantajoso quando confrontado com os outros métodos de análise. O sucesso obtido nos dois casos analisados, em especial no terceiro, deve-se à característica do sistema em estudo, um sistema quase que completamente radial, apresentando um número de malhas igual a 8% do número de barras.

A utilização do método ao segundo sistema mostrou-se desvantajosa. Isto é um resultado esperado considerando-se que o sistema apresenta um número de malhas igual a 50% do número de barras. Desta característica decorre que as malhas obtidas para o sistema não são as malhas básicas, fazendo com que a matriz que representa o sistema não seja diagonal predominante, o que se reflete diretamente na velocidade do processo iterativo. A não predominância na diagonal deve-se ao fato de que quando as malhas não são básicas o número de linhas comuns a duas malhas é normalmente superior a 1 e de que a quantidade de malhas que tem linhas comuns é bastante maior do que no caso de malhas básicas, o que significa dizer que os elementos da matriz são numericamente maiores do que os da matriz obtida com as malhas básicas e que há também um maior número de elementos.

No que se refere a ocupação de memória, esta é uma vantagem indiscutível dos métodos simplificados de análise. Isto, em virtude de não se considerar na análise as variáveis de controle, o fluxo de potência reativa nas linhas, a injeção de potência reativa nas barras, a tensão nodal e a resistência das linhas. Uma vantagem adicional quando é utilizada a análise de malha é que a matriz que representa a topologia do sistema tem uma dimensão muito menor do que a mesma matriz baseada na análise nodal.

Para que se faça um estudo de fluxo de carga simplificado as variáveis essenciais são a Potência nodal (P_i), a fase nodal (θ_i), o fluxo de potência ativa (F_{ij}) e a reatância da linha (X_{ij}) obtendo-se daí a matriz Y [BARRA] ou a matriz Z [MALHA] ao utilizar-se a análise nodal ou a análise de malha. Para um sistema que tem as dimensões do maior sistema testado por nós ($NB \approx 250$ e $NL \approx 270$) a análise de malha nos daria uma incrível vantagem se as matrizes fossem armazenadas cheias porque Y [BARRA] ocuparia 62500 posições de memória enquanto que Z [MALHA] ocuparia apenas 400. Sabemos, no entanto, que as matrizes são armazenadas compactamente, o que reduz sensivelmente a exigência de memória. No nosso caso, o número médio de linhas por barra é 3 o que significa dizer que são necessárias 625 posições de memória para armazenar Y [BARRA], sendo também 3 o número médio de malhas que tem linhas comuns, sendo necessárias 50 posições de memória para armazenar Z [MALHA]. Apesar de as quantidades exigidas serem bastante diferentes em cada caso, a quantidade de

memória exigida não se constitui problema em nenhum dos casos.

Depois da apresentação e da análise dos resultados passemos às conclusões.

- <1> Resultados obtidos com a análise de malha.
- <2> Resultados obtidos com a versão simplificada da PECO.
- <3> Resultados obtidos com o fluxo de carga AC da PECO.

- * V θ - Barra de Balanço
- ** PV - Barra de Tensão controlada
- *** PQ - Barra de Carga

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

Nosso objetivo a esta altura não é de chegar a conclusões definitivas e inabaláveis tomadas à luz de uns poucos casos analisados e sim, de apontar as potencialidades de um método de análise que começamos a investigar.

Do exposto e analisado no capítulo anterior nós cremos que a análise de malha é vantajosa em relação à análise nodal quando o sistema analisado apresenta uma pequena quantidade de malhas quando comparada ao número de barras do sistema, como é o caso do terceiro sistema testado, onde o número de malhas é 8% do número de barras. Neste tipo de sistema os resultados apresentados são satisfatórios tanto do ponto

de vista de precisão, quanto de velocidade, quanto de utilização de memória, mesmo que a utilização de memória não seja problema. Do ponto de vista de precisão de resultados o método foi satisfatório em todos os casos testados, levando-nos a crer que sob este aspecto não existe restrições para sua utilização. Bastante restritiva é a sua utilização em sistemas com topologia semelhante à do segundo sistema apresentado porque o esforço para a obtenção da matriz Z [MALHA] é muito grande e além do mais ela, como dito antes, não é diagonal predominante. Esta última desvantagem poderia ser contornada se o algoritmo para a obtenção da árvore do sistema fosse capaz de encontrar as suas malhas básicas ou se fosse utilizado um método direto de solução, tal como a Decomposição triangular. Mesmo assim, a primeira desvantagem prevaleceria.

Como os resultados obtidos são promissores para um determinado tipo de sistema, seria bastante interessante que se estudasse a aplicação da análise de malha ao fluxo de carga AC, isto é, estudar-se a possibilidade de aplicação da análise de malha à operação de Sistemas de Potência.

BIBLIOGRAFIA

- 01 - BRIAN STOTT - "Review of Load-flow calculation methods" - Proceedings do IEEE, Vol. 62, nº 7, Julho de 1974
- 02 - K. TAKAHASHI, Y. SEKINE, T. UMEZU - "Network-flow Method applied to load-flow calculation" - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 87, nº 11, Novembro de 1968.
- 03 - GLENN W. STAGG, AHMED H. EL-ABIAD - "Computer methods in power systems analysis" - McGraw Hill.
- 04 - W. F. TINNEY, C. M. McINTYRE - "A digital method for obtaining a loop connection matrix" - AIEE Transactions, Outubro de 1960.
- 05 - MARCIANO M. FILHO - "Matrizes Esparsas em redes de potência" - Tese de Mestrado, COPPE - UFRJ - 1977.

- 06 - R. T. BYERLY, R.W. LONG, C.W. KING - "Logic for applying topological methods to electric networks" - AIEE Transactions, Novembro de 1958.
- 07 - D. R. FULDERSON, L. R. FORD - "Flows in networks" - Princeton University, 1974.
- 08 - B. CARNAHAN, H. A. LUTHER, J. O. WILDES - "Applied Numerical methods" - John Wiley, 1976.
- 09 - J. E. BONAPARTE, W. W. MASLIN - "Simplified load flow" - AIEE Transactions, Volume 76, 1957.
- 10 - Subcommittee of the Transmission and Interconnection Special Technical Committee - "Criteria for AC Transmission System performance" - Fevereiro de 1963.