

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SIMULADOR DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

MARCKSON ROBERTO FERREIRA DE SOUSA

CAMPINA GRANDE

MAIO - 1992



SIMULADOR DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

MARCKSON ROBERTO FERREIRA DE SOUSA

SIMULADOR DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA da
Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

AREA DE CONCENTRAÇÃO: **PROCESSAMENTO DA ENERGIA**

WELLINGTON SANTOS MOTA

orientador

WASHINGTON EVANGELISTA DE MACEDO

co-orientador

CAMPINA GRANDE

MAIO - 1992



S725s Sousa, Marckson Roberto Ferreira de
Simulador de redes de distribuicao / Marckson Roberto
Ferreira de Sousa. - Campina Grande, 1992.
117 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

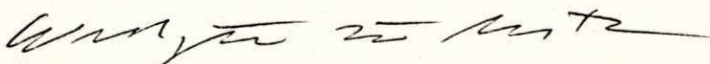
1. Redes de Distribuicao 2. Sistema Computacional
Integrado 3. Redes Eletricas 4. Dissertacao I. Mota,
Wellington Santos, Dr. II. Macedo, Washington Evangelista
de, Dr. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina
Grande (PB) IV. Título

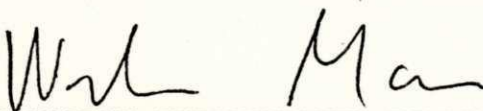
CDU 621.316.1(43)

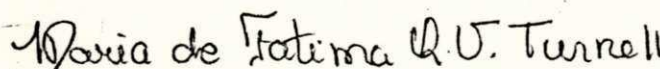
SIMULADOR DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

MARCKSON ROBERTO FERREIRA DE SOUSA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/05/92


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph. D., UFPb
orientador


WASHINGTON EVANGELISTA DE MACEDO, Mestre, UFPb
co-orientador


MÁRIA DE FATIMA Q. V. TURNELL, Ph. D., UFPb
componente da banca

MISAEL ELIAS DE MORAIS, Dr. - Ing, UFPb
componente da banca


ELIANE MARISE RAPOSO, Mestre, UFPb
componente da banca

CAMPINA GRANDE

MAIO - 1992

Dedicatória

A uma PESSOA ESPECIAL:

Venci mais uma difícil escalada. Mas não foi a sós, a glória, o triunfo, o ideal realizado e a ventura de ser um Mestre em Engenharia Elétrica, cabe por vezes mais a você do que a mim mesmo.

Quantas vezes pela minha fragilidade humana, fui impelido a parar, mas sentia que você, mesmo de longe lutava em sentido contrário, incentivando-me e estimulando-me.

Ao chegar ao objetivo final de uma etapa, e ao começar outra, agradeço a Deus por ter te conhecido e rogo para que não veja frustrada a minha esperança de um dia te ter sempre ao meu lado. Se eu não conseguir, aguardo desde já o momento além da volta da vida em que iremos nos encontrar ...

Agradecimentos

A DEUS:

Senhor, gostaria de agradecer de uma maneira mais bela, mas nossa imperfeição e nosso peso material ainda não nos deixam enxergar com os olhos do coração a tua sublime grandeza.

Deus, afastai de nosso coração toda a maldade e toda a vaidade, a fim de que, com fé simples de uma criança "saibamos confiar em nós".

É maravilhoso Senhor,
ter braços perfeitos quando há tantos mutilados;
ter olhos perfeitos quando há tantos sem luz;
minha voz que canta quando tantas emudeceram;
minhas mãos que trabalham quando tantas mendigam
voltar para casa quando tantos não têm para onde ir.

É maravilhoso Senhor,
amar, viver, sorrir, sonhar
quando há tantos que choram, odeiam,
revolvem-se em pesadelos, morrem antes de nascer.

É maravilhoso Senhor,
ter um Deus para crer
quando há tantos que não têm o consolo de uma crença.

É maravilhoso Senhor,
sobretudo, ter tão pouco a pedir,
tanto a oferecer e a agradecer.

AOS MEUS PAIS:

Autores do meu ser nos quais se espelham o reconhecimento de tudo que por vós sou e do nada que sem vocês seria. Para dedicar-lhes amor é preciso mais que palavras e gestos, ele bate a porta do meu coração a cada segundo da minha vida. Hoje meu coração bate descompassado de tanta alegria por conseguir caminhar mais um passo na minha profissão, mas estejam convictos que sem o vosso amor, as suas dedicações eu não teria subido esses degraus. Neste momento de alegria, dedico-lhes tudo que sou como filho, como amigo, ser humano, como profissional, porque sem as vossas orientações eu não conseguiria conquistar essa vitória.

Meu Pai e minha Mãe, a qualquer lugar que eu for o amor de vocês irá comigo.

AOS MEUS AMIGOS:

Pelo apoio e abnegação, de quando infinitas vezes o desânimo, o cansaço físico e mental, deixaram-me irritado, vocês souberam levantar "meu astral", pois de vocês também depende a vitória que hoje consigo. Muito obrigado pela força e compreensão em todos os momentos difíceis durante esta caminhada.

AOS MEUS PROFESSORES:

Sinto-me tão envaidecido de vós, tantos foram vossos exemplos e esforços que talvez não saiba exprimir em palavras o especial carinho, o amor sincero e gratidão que vos dedico.

Agradeço em especial, aos professores Wellington Santos Mota e Washington Evangelista de Macedo pela valiosa orientação.

Agradeço a todos os demais professores. Divido com vocês os méritos desta conquista, por que ela vos pertence, ela é tão vossa quanto minha.

AOS FUNCIONÁRIOS:

A vocês que integram o Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica onde cada um teve sua parcela de contribuição nesta caminhada.

Em especial, agradeço a gerência do sistema VAX. Ao colega e amigo eng. João Viana da Fonseca Neto; aos operadores Antônio Tavares Aleixo, Manoel Araújo Costa e Ivanildo Alves de Medeiros pelos recursos oferecidos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o meu engrandecimento profissional.

RESUMO

No ensino de algumas disciplinas na área de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), um dos problemas normalmente encontrados é a dificuldade de realizar-se experimentos práticos, face a dificuldade de se reproduzir um SEP, ainda que reduzido, em laboratório. A utilização de "analizadores de rede" também apresenta uma série de problemas operacionais e praticamente não são mais utilizados. O computador digital vem sendo largamente utilizado na solução deste problema.

Neste trabalho é apresentado um Sistema Computacional Integrado, usando simultaneamente computação gráfica e computação numérica para simular a operação de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) em regime permanente. O simulador permite a realização, de forma interativa de análise de: queda de tensão, carregamento de alimentadores, alocação de reativos, curto-circuito, reconfiguração da rede e modelagem probabilística das cargas.

O sistema computacional deverá ser utilizado como apoio didático a cursos na área de SDEE, podendo também ser utilizado para treinamento de técnicos em despacho e operação das redes de Energia Elétrica.

ABSTRACT

One of the problems normally found on Power System lecturing, is experiment realizations. this fact arises from the difficulty of constructing a physical system, even a reduced model. Network analyzers, also present operational problems which forced them out of use today. Digital computers have been used with success for this kind of problem through digital simulation.

This work presents an Integrated Computational System using simultaneously graphic computations and numerical computations. The objective is to simulate an Electric Power System Distribution in steady state. The simulator provides in interactive form the analysis of: voltage drop, feeders loading, reactive location, faults, network reconfiguration and probabilistic loads modeling.

The computational system should be used for didactic purposes in Electric Power System Distribution courses. Also, for the training of technicians working in the operation and dispatch of Electric Power Systems.

SUMÁRIO

	PÁGINA
1 INTRODUÇÃO	
1.1 Considerações Gerais	001
1.2 Objetivos	003
1.3 Revisão de trabalhos anteriores e motivação da pesquisa	003
1.4 Organização dos capítulos	007
1.5 Contribuição da pesquisa	008
2 DESCRIÇÃO DO SIMULADOR	
2.1 Introdução	009
2.2 O sistema	010
2.3 Modelagem	012
2.3.1 Modelagem das cargas	014
2.3.2 Abertura e fechamento de dispositivos	016

2.3.3 Modelagem matemática para os dispositivos de proteção	030
2.3.4 Critério dos mínimos quadrados	030
2.3.5 Resultados obtidos	036
2.4 Resolução do circuito elétrico	041
2.4.1 Cálculo das correntes	045
2.5 Formação do diagrama unifilar	047
2.6 Utilização do simulador	050

3 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO NORMAL

3.1 Introdução	053
3.2 Simulação determinística	056
3.3 Simulação propabilística	058

4 SIMULAÇÃO DE FALTAS

4.1 Introdução	064
4.2 Proteção	065
4.2.1 Filosofia da Proteção	065

4.2.2	Finalidades da Proteção	065
4.2.3	Requisitos da Proteção	066
4.2.4	Benefícios da Proteção	067
4.3	Coordenação da Proteção	067
4.3.1	Filosofia da Coordenação	067
4.4	Dispositivos de interligação e proteção	069
4.4.1	Chaves de manobra e proteção	071
4.5	Coordenação e seletividade	073
4.6	Resultados da simulação do Curto-circuito	075
4.7	Importância da disposição dos equipamentos no circuito	085

5 MODIFICAÇÃO DAS CARGAS

5.1	Introdução	089
5.2	Utilização deste módulo	090

6	CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS	092
---	--------------------------------	-----

ANEXO

I - Método da Bifatoração 095

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 114

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
2.1 - Diagrama unifilar do sistema utilizado	010
2.2 - Sistema simples	013
2.3 - Circuito equivalente para o diagrama unifilar da figura 2.2	014
2.4 - Dispositivo representado por impedância constante	015
2.5 - Curva típica de um dispositivo protetor	032
2.6 - Circuito elétrico com 5 nós	042
2.7 - Enfatização do nó de referência	042
2.8 - Representação da linha de transmissão	045
2.9 - Tela de abertura	050
2.10 - Menu Principal	051

3.1 - Seleção da opção de Fluxo de Carga	054
3.2 - Descrição do módulo de Fluxo de Carga	055
3.3 - Diagrama unifilar do sistema - Fluxo de Carga	055
3.4(a) - Resultado da primeira simulação	057
3.4(b) - Resultado da segunda simulação	057
3.4(c) - Resultado da terceira simulação	058
3.5 - Representação da carga com distribuição normal	060
4.1 - Seleção da opção de Curto-circuito	076
4.2(a) - Descrição do módulo de Curto-circuito	076
4.2(b) - Diagrama unifilar do sistema - Curto-circuito	077
4.3 - Atuação do sistema de proteção	079
4.4 - Operação inválida em algum equipamento	079
4.5(a) - Manobra em chave inexistente	080
4.5(b) - Manobra em equipamento inexistente	080
4.6 - Abertura da chave número 3	081

4.7 - Resultado da abertura da chave 3	082
4.8 - Manobra para fechar a chave C1	083
4.9 - Manobra para fechar a chave C2	084
4.10 - Resultado do fechamento de C2	084
4.11 - Sistema com o acréscimo de uma chave	085
4.12 - Ocorrência de uma falta no sistema	086
4.13 - Abertura da chave número 4	086
4.14 - Fechamento da chave C1	087
4.15 - Abertura da chave número 3	087
4.16 - Fechamento de C2	088
5.1 - Seleção da opção de Modificação das Cargas	089
5.2 - Tela para Modificação das Cargas	090
5.3 - Seleção de um ponto de carga	091

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
3.1 - Cargas: Valor Esperado e Desvio Padrão	061
3.2 - Resultado de 5 simulações	062

LISTA DE ABREVIATURAS

SEP - Sistemas Elétricos de Potência

SDEE - Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SISDI - Simulador de Sistemas de Distribuição

FETEC - Feira de Tecnologia

LCK - Lei das Correntes de Kirchhoff

MW - Mega Watt

Mvar - Mega Volt Ampere Reativo

S/E - Subestação

CELPE - Companhia Energética de Pernambuco

1. INTRODUÇÃO.

1.1 *Considerações Gerais*

O computador digital é atualmente a principal ferramenta utilizada no planejamento, projeto e operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

Com o auxílio da informática, busca-se aumentar a produtividade das atividades ligadas à Distribuição de Energia Elétrica, destacando-se a grande evolução alcançada nos sistemas de supervisão e controle dos circuitos elétricos.

Na atualidade, devido ao crescimento dos SEP em tamanho e complexidade, a análise tem sido enormemente facilitada com apoio do computador digital.

Em especial, no caso de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), que são formados pela interligação de centenas ou até milhares de componentes, tornando impraticável a realização de experimentos práticos em laboratórios, a utilização do computador digital representa

um recurso de inestimável importância, servindo também como ferramenta didática.

De uma maneira geral, no Brasil, ao contrário do que ocorre nos países desenvolvidos, os experimentos práticos realizados na área de Sistemas Elétricos de Potência ainda são realizados nos tradicionais laboratórios de máquinas elétricas. Apesar destes experimentos serem de importância fundamental, eles fornecem uma visão do comportamento isolado dos componentes, proporcionando assim apenas uma visão parcial do problema.

A utilização do computador digital em conjunto com sistemas computacionais especialmente desenvolvidos para educação/treinamento permite que o desempenho de sistemas elétricos reais, que contém um grande número de componentes, possa ser analisado de forma eficiente e em curto espaço de tempo. Além disto, a experiência neste campo mostra que estes procedimentos motivam bastante os participantes.

Recentemente, tem sido publicado um grande número de artigos relatando o desenvolvimento de Sistemas Computacionais e Simuladores desenvolvidos por Universidades e Empresas, para apoio aos programas de educação/treinamento na área de Sistemas Elétricos de Potência [Galindo 1990], [Huang 1991], etc. Todavia, na área de SDEE a relação de publicações é bastante reduzida.

1.2 *Objetivos*

Um dos objetivos do Laboratório de Sistemas de Potência do DEE/UFPb é o desenvolvimento de simuladores flexíveis e amigáveis para simulação de Sistemas Elétricos de Potência para serem utilizados em atividades de ensino e pesquisa.

É objetivo desta dissertação descrever o estágio atual de um Sistema Computacional Integrado para simulação digital da operação de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, em regime de operação estática. Usando processamento numérico em conjunto com computação gráfica e uma interface homem-máquina adequada busca-se tornar o processo ágil e versátil.

O simulador tem a finalidade de apoiar cursos de Graduação, Extensão e Pós-Graduação relacionados com a operação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, bem como o treinamento de técnicos na operação das redes.

1.3 *Revisão de trabalhos anteriores e motivação da pesquisa*

A utilização do computador digital como ferramenta de apoio didático não é recente no ensino de engenharia. Na área de Sistemas Elétricos de Potência, este tipo de

utilização foi iniciado praticamente na mesma época em que foi iniciado o uso do computador digital para análise destes sistemas. No início a utilização dos computadores analógicos foi mais intensa, mas ao longo dos anos, devido a problemas operacionais, estes foram perdendo sua importância, sendo utilizados atualmente em um número restrito de casos.

Por outro lado, os aplicativos utilizados para o ensino eram desenvolvidos para serem usados por empresas do setor, não havendo nenhuma preocupação com o aspecto didático-pedagógico. Esta pode ser considerada como a primeira fase da utilização do computador digital como ferramenta didática nesta área de aplicação.

Na década de setenta, diversas Universidades e Empresas de países desenvolvidos passaram a desenvolver Sistemas Computacionais Integrados com a finalidade de apoiar cursos na área de Sistemas Elétricos de Potência. Os sistemas desenvolvidos cobriam todas as áreas de aplicação em Engenharia Elétrica.

Atualmente, o desenvolvimento de trabalhos nesta área é bastante intenso. A principal razão para esta intensificação, é o grande desenvolvimento alcançado pela computação gráfica, que proporciona condições para o desenvolvimento de simuladores bastante sofisticados e que proporcionam um ambiente favorável para o ensino de disciplinas na área de Sistemas Elétricos de Potência.

No Brasil, o desenvolvimento de trabalhos na área de SDEE é bastante recente. Raras são as publicações da área, excetuando o trabalho desenvolvido no Laboratório de Sistemas de Potência do DEE/UFPb, que ainda encontra-se em fase inicial.

Para automatização da atividade de coordenação da proteção, já empregada em algumas empresas da área e desenvolvida nos setores de planejamento e operação, [Galindo 1990] propõe algumas equações obtidas a partir da modelagem matemática para atuação dos dispositivos no intuito de representar a sua operação. A metodologia utilizada é bastante elementar e com sua aplicação à engenharia, é proposta uma das formas de se iniciar o processo automatizado para supervisão e controle da proteção nos sistemas de distribuição.

Com efeito didático, a principal publicação na área, [Borghi 1990] descreve um sistema computacional para simular a operação de um SDEE, desenvolvido para ser utilizado no treinamento de operadores de Sistemas de Distribuição da Eletropaulo. Este trabalho, desenvolvido em linguagem GWBASIC (Microsoft), considera apenas o problema da continuidade de operação, sem fazer qualquer análise das grandezas elétricas, considerando ainda todas as grandezas envolvidas na simulação como determinísticas.

Motivação da Pesquisa:

Do exposto acima advém a necessidade de todas as empresas da área de Distribuição de Energia Elétrica buscarem um meio de facilitar o treinamento de novos profissionais envolvidos na operação das redes.

Este tipo de estudo, desenvolvido no âmbito do Grupo de Sistemas de Potência do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba com a utilização do computador digital nesta área desde 1990 (FETEC'90), possibilitou o acúmulo de experiências na área de formação de diagramas unifilares e operação de redes de distribuição.

No princípio, todas as operações eram preestabelecidas mas com o avanço da pesquisa, chegou-se a uma simulação totalmente aleatória dos dados do sistema, sendo esta a filosofia utilizada pelo simulador.

Devido a economia de tempo de treinamento, a integração homem-computador vem a possibilitar com grande rapidez a simulação de milhares de casos diferentes de operação do sistema, o que outrora demandaria talvez até alguns anos de trabalho.

1.4 Organização dos capítulos

No capítulo inicial é feita uma descrição dos objetivos gerais do trabalho, sendo enfatizada a utilização do computador digital na área de Sistemas Elétricos de Potência.

O capítulo 2 apresenta uma descrição do simulador, incluindo discussão sobre o sistema utilizado, a modelagem dos componentes, a solução para o modelo e os aspectos básicos de utilização do simulador.

No capítulo 3 é discutida a utilização do sistema computacional para simular a operação do sistema funcionando em regime normal. Deste modo são analisados problemas de queda de tensão, carregamento das linhas, variação da tensão com a carga.

No capítulo 4 é discutida a utilização do simulador para análise de curto-circuito, chaveamento do sistema e coordenação da proteção, com simulação de faltas e tomada de decisões "On-Line" provocando modificações na estrutura da rede.

No capítulo 5 é apresentado o módulo correspondente a Modificação das Cargas, cujo objetivo básico é a alteração dos dados do sistema de forma mais simples para o usuário.

As conclusões são apresentadas no capítulo 6.

1.5 *Contribuição da Pesquisa*

A principal contribuição da pesquisa consiste no desenvolvimento de um sistema computacional integrado, utilizando simultaneamente computação gráfica e computação numérica para simular a operação de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica em regime de operação estática.

O simulador representa uma importante ferramenta de apoio didático, podendo ser utilizado em cursos de Graduação, Pós-graduação e Extensão que envolvam a operação de Sistemas Elétricos de Distribuição.

O simulador desenvolvido envolve uma tecnologia relativamente nova e é na área indubitavelmente um dos pioneiros na região.

2. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR

2.1. *Introdução*

Neste capítulo será apresentada uma descrição detalhada do SISDI, discutindo o sistema escolhido, o modelo matemático utilizado, a técnica utilizada para solução do modelo e as situações operacionais que podem ser simuladas. O nome do sistema é PEGASUS.

A escolha do sistema utilizado no SISDI foi realizada considerando-se duas condições fundamentais:

- Sistema com configuração típica contendo os componentes básicos de um SDEE.
- Possibilidade de disposição adequada do diagrama unifilar do sistema na tela do monitor.

Após uma série de testes, chegou-se a conclusão que o diagrama mostrado na figura 2.1 é um dos que possuem uma disposição adequada para satisfazer as duas condições apresentadas.

A tela apresentada na figura 2.1, além do diagrama unifilar do sistema, mostra também as instruções para operação do SISDI (parte inferior do vídeo) e os resultados numéricos da simulação (parte direita do vídeo).

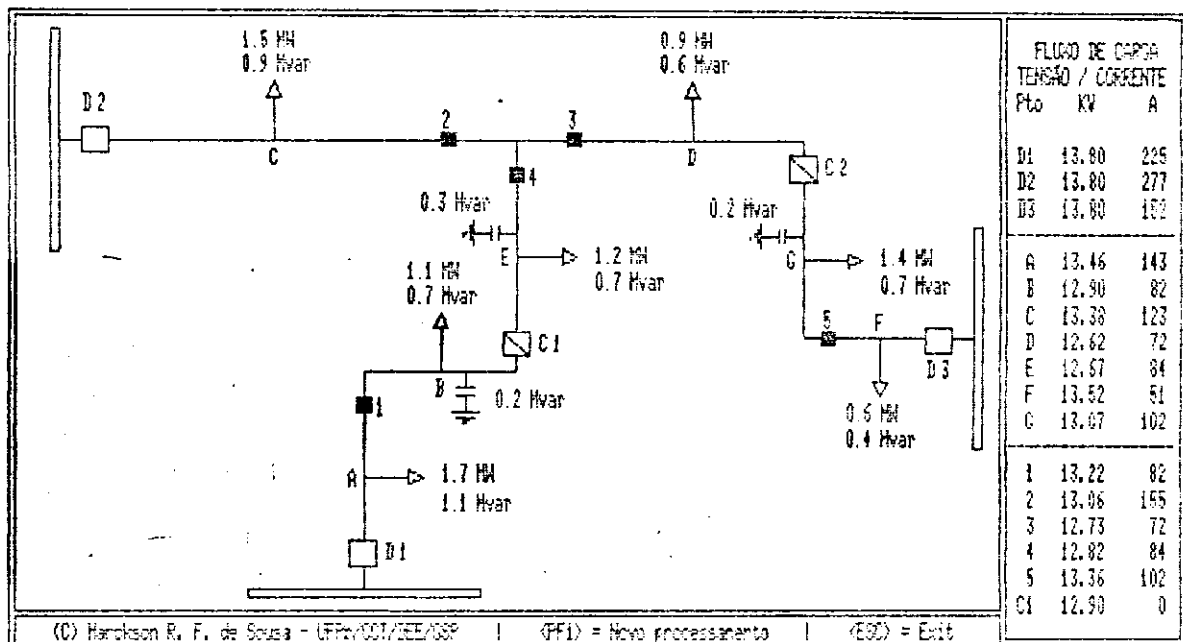


Figura 2.1 - Diagrama unifilar do sistema utilizado

2.2 O sistema

O sistema utilizado no simulador, cujo diagrama unifilar é apresentado na figura 2.1, embora simples, apresenta as principais características de um Sistema de Distribuição típico com configuração radial e facilidades de interligação, através de chaves normalmente abertas.

A seguir são apresentadas algumas características específicas do sistema:

- *Subestações*

Existem 3 barramentos representando as subestações que alimentam o sistema. Quando este encontra-se operando normalmente, cada subestação está conectada a cada alimentador através dos disjuntores D1, D2 e D3. Quando ocorre uma contingência pode-se reconfigurar o sistema utilizando-se as chaves C1 e C2 que são chaves normalmente abertas, e o mesmo pode então ser alimentado através de uma, duas ou três subestações.

- *Alimentadores*

No sistema existem 3 alimentadores onde em situação normal, cada um é alimentado através de uma subestação distinta. Os alimentadores são interconectados através das chaves normalmente abertas C1 e C2. No processo de simulação estas chaves são manobradas interativamente. Além das chaves normalmente abertas cada alimentador contém um conjunto de chaves fusíveis que atuam, abrindo o circuito, quando submetidas a um nível de corrente superior àquele preestabelecido, ou alternativamente, podem ser manobradas interativamente.

- Cargas

De uma maneira geral, nos sistemas reais as cargas encontram-se distribuídas ao longo do alimentador. Todavia, na análise destes sistemas, para efeito de cálculo de tensões e correntes, as cargas são agrupadas em determinados pontos do alimentador. No diagrama apresentado na figura 2.1, as cargas são representadas por setas, e estão colocadas nos pontos A, B, C, D, E, F e G. Os valores das cargas podem ser modificados interativamente.

2.3 Modelagem

Nesta seção será apresentado o modelo utilizado para representar o sistema. Duas características básicas foram consideradas na escolha do modelo:

- Flexibilidade, para proporcionar a simulação dos diversos "modos" de atuação de um SDEE.
- Reduzido esforço computacional, para solução de cada caso.

Na figura 2.2 é apresentado o diagrama unifilar de um sistema simples, mas contendo as características básicas do sistema utilizado no simulador. O sistema contém duas fontes de alimentação S1 e S2 e dois alimentadores que podem ser conectados através da chave C1 (normalmente

aberta). Também são apresentados na figura 2.2 as cargas A, B, C e D e os dispositivos de seccionamento, disjuntores (D1 e D2) e as chaves fusíveis (1 e 2).

Em regime de operação normal a chave C1 encontra-se aberta e o sistema é alimentado através das subestações S1 e S2.

Na figura 2.3 é apresentado o circuito equivalente para o sistema, no qual as fontes são representadas por fontes de tensão (S1 e S2), os dispositivos de proteção são representados por resistores (1, 2, C1, D1, D2) e as cargas representadas por impedâncias (A, B, C, D).

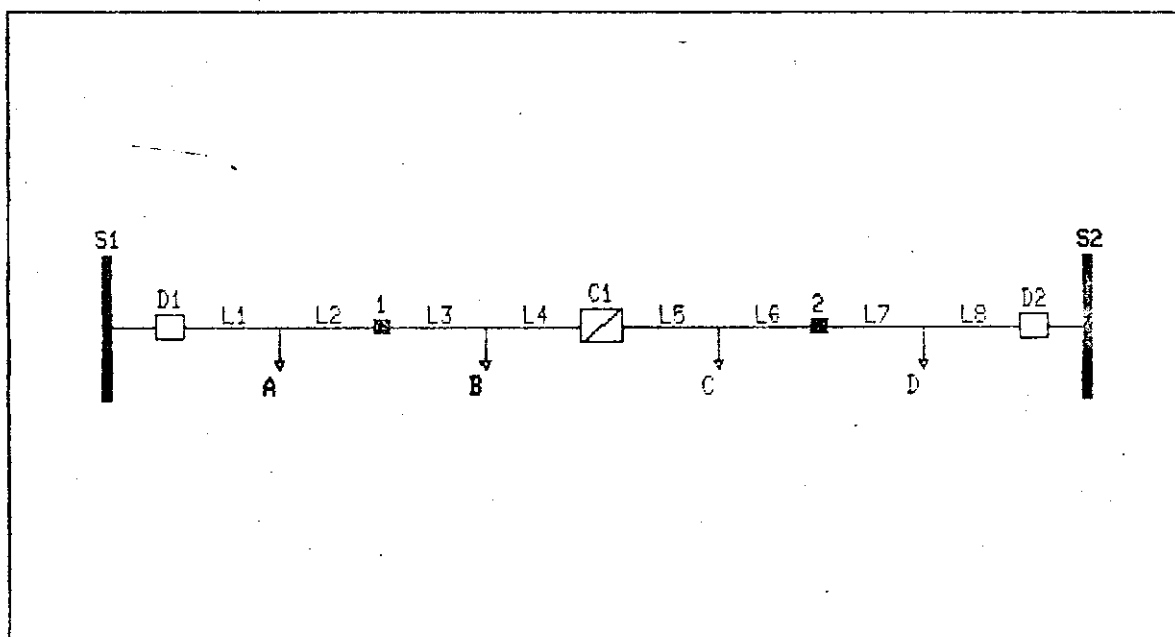


Figura 2.2 - Sistema simples

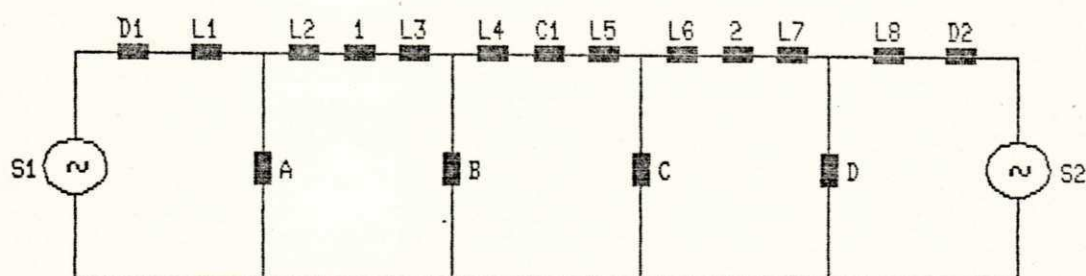


Figura 2.3 - Circuito equivalente para o diagrama unifilar da figura 2.2

2.3.1 Modelagem das cargas

Na simulação dos Sistemas de Distribuição reais, a carga em geral é modelada utilizando-se duas componentes. Uma componente é modelada por impedância constante (a parcela da carga que varia com o quadrado da tensão) e a outra componente é modelada por potência constante (parcela da carga que não varia com a tensão). A proporção de cada parcela depende das características da carga do sistema. Este tipo de modelagem faz com que o modelo venha a tornar-se não-linear.

Existem diversas técnicas de solução para este tipo de problema, bastante frequente no estudo de redes elétricas. Todavia, dependendo dos dados de entrada o processo de solução usando estas técnicas pode ou não convergir. Isto ocorre com frequência nos casos em que as tensões finais do processo são bem diferentes das tensões estimadas. Esta característica poderia afetar a utilização do simulador.

Para evitar estes problemas, utilizou-se uma modelagem bastante simples para representar a carga, que é a sua representação completa através de uma impedância. Este procedimento faz com que o modelo do sistema seja linear, facilitando a sua solução e além disto, proporcionando sempre uma solução para o problema.

Na figura 2.4 é apresentada uma admitância que representa uma carga.

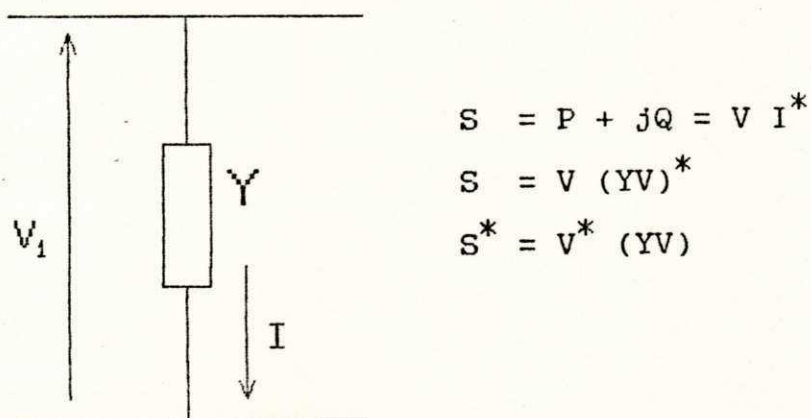


Figura 2.4 - Dispositivo representado por impedância constante

$$\therefore Y = \frac{S^*}{V^* V} = \frac{S^*}{|V|^2}$$

onde verifica-se que ocorre uma variação com o quadrado do nível de tensão.

2.3.2 Abertura e fechamento de dispositivos

Durante o processo de simulação os dispositivos de proteção, disjuntores e chaves fusíveis, podem ser encontrados operando (circuito fechado) ou abertos. Para representar esta situação, estes elementos, como também as chaves normalmente abertas, são modelados da seguinte forma:

$$R = \begin{cases} 1 \mu\Omega & \text{quando o dispositivo encontra-se} \\ & \text{operando (fechado)} \\ 1 M\Omega & \text{quando o dispositivo encontra-se} \\ & \text{aberto} \end{cases}$$

Estes valores foram obtidos considerando-se a ordem de grandeza dos elementos componentes do restante do circuito.

Para a verificação da metodologia utilizada, são mostrados abaixo alguns resultados obtidos a partir da simulação do Fluxo de Carga LFN, desenvolvido na Alemanha, para o sistema utilizado neste trabalho (Fig. 2.1).

*** FLUXO_DE_CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN

LIMITE = 10 ITERACOES, FREQUENCIA= 60.0 HZ, AMORTECIM= 0.00

AS TOLERANCIAS NA POTEN.ATIVA POT.REATIVA CONTR.TENSOES
 0.0010 0/0 0.0010 0/0 0.001000 0/0

FONTES	CARGAS	RAMOS
SL P,Q	<S> S=CONSTANT	L LINHA, CABO, REATOR
GER P,Q=CONST	<Z> Z=CONSTANT	T TRAFD SEM TAPES
#KV DESEJADO	<I> I=CONSTANT <K> ALFA=CONST	T#T TRAFD COM TAPES (FIX OU VAR) AD LADO "DA BARRA"

SINAIS

FONTE	P > 0	Q(L) > 0	Q(C) < 0
CARGA	P > 0	Q(L) > 0	Q(C) < 0
IMPED		Q(L) > 0	Q(C) < 0
PHI_Z		PHI(L) > 0	PHI(C) < 0

PERITO_GSP: MARCKSON FERREIRA

PERITO_FGH: BERND STEIN

*** FLUXO_DE_CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SISTEMA GERAL

LISTA DE BARRAS: SLACK(SL) & CARGAS(B1)

SEQ NO.	BARRAS NOME	NOMINAL UN / KV	U/KV (SL) P/MW (B1)	FA/GRAU Q/MVAR	SLACK <TIP>	Z=C-O-N-S-T-A-N-T P/MW	Q/MVAR
1	SLK_01	13.800	13.800	0.000	SLACK		
2	SLK_02	13.800	13.800	0.000	SLACK		
3	SLK_03	13.800	13.800	0.000	SLACK		
1	SUB_01	13.800	0.000	0.000	<S>	1.800	1.116
2	SUB_03	13.800	0.000	0.000	<S>	1.200	0.744
3	SUB_05	13.800	0.000	0.000	<S>	1.500	0.929
4	SUB_06	13.800	0.000	0.000	<S>	0.900	0.558
5	SUB_08	13.800	0.000	0.000	<S>	1.100	0.682
6	SUB_11	13.800	0.000	0.000	<S>	0.600	0.372
7	SUB_12	13.800	0.000	0.000	<S>	1.500	0.929

LISTA DE RAMOS: LINHAS(L1) & TRANSFORMADORES(T1, COM P(FE)/S(FE)=0.075)

SEQ NO.	DA BARRA	PARA BARRA	R/OHM	X/OHM	G/MUS(L1)C/MUF	G/MUS(T1)B/MUS	TRAFO-TAPES(RT) BARRA	U(RT)/%
1	SLK_01	DIJ_01	0.000	0.000	0.000	0.000	L1	
2	SLK_02	DIJ_02	0.000	0.000	0.000	0.000	L1	
3	SLK_03	DIJ_03	0.000	0.000	0.000	0.000	L1	
4	DIJ_01	SUB_01	1.000	1.300	0.000	0.000	L1	
5	SUB_01	CNF_01	2.000	2.700	0.000	0.000	L1	
6	CNF_01	SUB_03	2.700	3.300	0.000	0.000	L1	
7	SUB_03	CNA_01	1.400	0.700	0.000	0.000	L1	
8	CNA_01	CNA#01	1000000	0.000	0.000	0.000	L1	
9	DIJ_02	SUB_05	1.000	1.300	0.000	0.000	L1	
10	SUB_05	CNF_02	1.300	2.000	0.000	0.000	L1	
11	CNF_02	PTL_01	1.000	1.300	0.000	0.000	L1	
12	PTL_01	SUB_06	2.000	2.700	0.000	0.000	L1	
13	SUB_06	CNA_02	1.500	0.700	0.000	0.000	L1	
14	CNA_02	CNA#02	1000000	0.000	0.000	0.000	L1	
15	PTL_01	CNF_03	0.100	0.120	0.000	0.000	L1	
16	CNF_03	SUB_08	1.300	2.000	0.000	0.000	L1	
17	SUB_08	CNA#01	1.200	0.300	0.000	0.000	L1	
18	DIJ_03	SUB_11	1.300	1.600	0.000	0.000	L1	
19	SUB_11	CNF_04	1.000	1.700	0.000	0.000	L1	
20	CNF_04	SUB_12	2.000	2.700	0.000	0.000	L1	
21	SUB_12	CNA#02	1.100	2.000	0.000	0.000	L1	

MATRIZ DE ADMITANCA MONTADA,
 SIMULACAO TERMINADA,
 REDUCAO TERMINADA,
 DEPOIS A 0. ITERACAO TERMINADA

*** FLUXO DE CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SISTEMA GERAL

NOME U/NOMIN	TENSÃO DA BARRA	I <CARGAS>E I CONEXOES	FLUXO DE CARGA DE E PARA OUTRAS BARRAS				
			P/MW	Q/MVAR	S/MVA	P/S	FA/G
SLK_01	0.00 13.800 13.80	GRI DIJ_01 L KVI PUI	2.83	1.82	3.36	0.841	32.8
SLK_02	0.00 13.800 13.80	GRI DIJ_02 L KVI PUI	3.22	2.11	3.85	0.836	33.2
SLK_03	0.00 13.800 13.80	GRI DIJ_03 L KVI PUI	1.96	1.27	2.34	0.839	33.8
SUB_01	-0.57 13.424 13.80	GRI KVI <Z> PUI	1.70	1.06	2.00	0.850	31.8
		I DIJ_01 L	-2.77	-1.74	3.27	-0.846	32.2
		I CNF_01 L	1.07	0.69	1.27	0.840	32.9
SUB_03	-1.63 12.746 13.80	GRI KVI <Z> PUI	1.02	0.63	1.20	0.850	31.8
		I CNF_01 L	-1.02	-0.63	1.20	-0.850	31.8
		I CNA_01 L	0.00	0.00	0.00	0.832	-33.7
SUB_05	-0.65 13.368 13.80	GRI KVI <Z> PUI	1.41	0.87	1.66	0.850	31.8
		I DIJ_02 L	-3.15	-2.01	3.73	-0.843	32.6
		I CNF_02 L	1.74	1.14	2.08	0.836	33.2
SUB_06	-2.08 12.571 13.80	GRI KVI <Z> PUI	0.75	0.46	0.88	0.850	31.8
		I PTL_01 L	-0.75	-0.46	0.88	-0.850	31.8
		I CNA_02 L	0.00	0.00	0.00	-0.936	-20.7
SUB_08	-2.10 12.592 13.80	GRI KVI <Z> PUI	0.92	0.57	1.08	0.850	31.8
		I CNF_03 L	-0.92	-0.57	1.08	-0.850	31.8
		I CNA#01 L	0.00	0.00	0.00	-0.828	-34.1
SUB_11	-0.46 13.468 13.80	GRI KVI <Z> PUI	0.57	0.35	0.67	0.850	31.8
		I DIJ_03 L	-1.92	-1.23	2.28	-0.843	32.6
		I CNF_04 L	1.35	0.87	1.61	0.840	32.9

*** FLUXO DE CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SISTEMA GERAL

NOME U/NOMIN	TENSÃO DA BARRA	I <CARGAS>E I CONEXÕES	FLUXO DE CARGA DE E PARA OUTRAS BARRAS				
			P/MW	Q/MVAR	S/MVA	P/S	FA/G
		-1.55 GRI					
SUB_12	12.885 KVI	<Z>	1.31	0.81	1.54	0.850	31.8
13.80	0.9337 PUI						
		I CNF_04 L	-1.31	-0.81	1.54	-0.850	31.8
		I CNA#02 L	0.00	0.00	0.00	0.939	-20.1
		0.00 GRI					
DIJ_01	13.800 KVI						
13.80	1.0000 PUI						
		I SLK_01 L	-2.83	-1.82	3.36	-0.841	32.8
		I SUB_01 L	2.83	1.82	3.36	0.841	32.8
		0.00 GRI					
DIJ_02	13.800 KVI						
13.80	1.0000 PUI						
		I SLK_02 L	-3.22	-2.11	3.85	-0.836	33.2
		I SUB_05 L	3.22	2.11	3.85	0.836	33.2
		0.00 GRI					
DIJ_03	13.800 KVI						
13.80	1.0000 PUI						
		I SLK_03 L	-1.96	-1.27	2.34	-0.839	33.0
		I SUB_11 L	1.96	1.27	2.34	0.839	33.0
		-1.06 GRI					
CNF_01	13.127 KVI						
13.80	0.9513 PUI						
		I SUB_01 L	-1.05	-0.66	1.24	-0.845	32.4
		I SUB_03 L	1.05	0.66	1.24	0.845	32.4
		-1.63 GRI					
CNA_01	12.746 KVI						
13.80	0.9236 PUI						
		I SUB_03 L	0.00	0.00	0.00	-0.832	-33.7
		I CNA#01 L	0.00	0.00	0.00	0.832	-33.7
		-2.10 GRI					
CNA#01	12.592 KVI						
13.80	0.9125 PUI						
		I CNA_01 L	0.00	0.00	0.00	-0.828	-34.1
		I SUB_08 L	0.00	0.00	0.00	0.828	-34.1
		-1.30 GRI					
CNF_02	13.030 KVI						
13.80	0.9442 PUI						
		I SUB_05 L	-1.71	-1.09	2.03	-0.843	32.6
		I PTL_01 L	1.71	1.09	2.03	0.843	32.6

*** FLUXO_DE_CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SISTEMA GERAL

NOME U/NOMIN	TENSÃO DA BARRA	I <CARGAS>E I CONEXÕES	FLUXO DE CARGA DE E PARA OUTRAS BARRAS				
			P/MW	Q/MVAR	S/MVA	P/S	FA/G

	-1.69 GRI						
PTL_01	12.790 KVI						
13.80	0.9268 PUI						
		I CNF_02 L	-1.68	-1.06	1.99	-0.846	32.2
		I SUB_06 L	0.76	0.48	0.89	0.846	32.2
		I CNF_03 L	0.93	0.58	1.09	0.846	32.2

	-2.08 GRI						
CNA_02	12.571 KVI						
13.80	0.9110 PUI						
		I SUB_06 L	0.00	0.00	0.00	0.936	-20.7
		I CNA#02 L	0.00	0.00	0.00	-0.936	-20.7

	-1.55 GRI						
CNA#02	12.885 KVI						
13.80	0.9337 PUI						
		I CNA_02 L	0.00	0.00	0.00	0.939	-20.1
		I SUB_12 L	0.00	0.00	0.00	-0.939	-20.1

	-1.71 GRI						
CNF_03	12.777 KVI						
13.80	0.9259 PUI						
		I PTL_01 L	-0.93	-0.58	1.09	-0.846	32.2
		I SUB_08 L	0.93	0.58	1.09	0.846	32.2

	-0.91 GRI						
CNF_04	13.258 KVI						
13.80	0.9607 PUI						
		I SUB_11 L	-1.34	-0.85	1.58	-0.844	32.4
		I SUB_12 L	1.34	0.85	1.58	0.844	32.4

Considerando-se agora apenas o subsistema 1,

tem-se:

*** FLUXO_DE_CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SUBSISTEMA 1

LISTA DE BARRAS: SLACK(SL) & CARGAS(B1)

SEQ NO.	BARRAS NOME	NOMINAL UN / KV	U/KV (SL) P/MW (B1)	FA/GRAU Q/MVAR <TIP>	SLACK	Z=C-O-N-S-T-A-N-T P/MW	Q/MVAR
1	SLK_01	13.800	13.800	0.000	SLACK		
1	SUB_01	13.800	0.000	0.000	<S>	1.800	1.116
2	SUB_03	13.800	0.000	0.000	<S>	1.200	0.744

LISTA DE RAMOS: LINHAS(L1) & TRANSFORMADORES(T1, COM P(FE)/S(FE)=0.075)

SEQ DA NO. BARRA	PARA BARRA	R/DHM	X/DHM	G/MUS(L1)C/MUF	G/MUS(T1)B/MUS	TRAFO-TAPES(RT) BARRA	U(RT)/%
1	SLK_01 DIJ_01	0.000	0.000	0.000	0.000	L1	
2	DIJ_01 SUB_01	1.000	1.300	0.000	0.000	L1	
3	SUB_01 CNF_01	2.000	2.700	0.000	0.000	L1	
4	CNF_01 SUB_03	2.700	3.300	0.000	0.000	L1	
5	SUB_03 CNA_01	1.400	0.700	0.000	0.000	L1	

MATRIZ DE ADMITANCA MONTADA,
 SIMULACAO TERMINADA,
 REDUCAO TERMINADA,
 DEPOIS A 0. ITERACAO TERMINADA

*** FLUXO_DE_CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SUBSISTEMA 1

NO ME U/NOMIN	TENSAO DA BARRA	I <CARGAS>E I CONNEXOES	FLUXO DE CARGA DE E PARA OUTRAS BARRAS			
			P/MW	Q/MVAR	S/MVA	P/S FA/B
	0.00	GRI DIJ_01 L	2.83	1.82	3.36	0.841 32.8
SLK_01	13.800	KVI				
13.00	1.0000	PUI				
	-0.57	GRI				
SUB_01	13.424	KVI <Z>	1.70	1.06	2.00	0.850 31.8
13.00	0.9720	PUI				
		I DIJ_01 L	-2.77	-1.74	3.27	-0.846 32.2
		I CNF_01 L	1.07	0.69	1.27	0.840 32.9
	-1.63	GRI				
SUB_03	12.746	KVI <Z>	1.02	0.63	1.20	0.850 31.8
13.00	0.9236	PUI				
		I CNF_01 L	-1.02	-0.63	1.20	-0.850 31.8
		I CNA_01 L	0.00	0.00	0.00	0.422 -65.1
	0.00	GRI				
DIJ_01	13.800	KVI				
13.00	1.0000	PUI				
		I SLK_01 L	-2.83	-1.82	3.36	-0.841 32.8
		I SUB_01 L	2.83	1.82	3.36	0.841 32.8
	-1.06	GRI				
CNF_01	13.127	KVI				
13.00	0.9513	PUI				
		I SUB_01 L	-1.05	-0.66	1.24	-0.845 32.4
		I SUB_03 L	1.05	0.66	1.24	0.845 32.4
	-1.63	GRI				
CNA_01	12.746	KVI				
13.00	0.9236	PUI				
		I SUB_03 L	0.00	0.00	0.00	-0.422 -65.1

Processando-se apenas o subsistema 2, obtem-se:

*** FLUXO DE CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SUBSISTEMA 2

LISTA DE BARRAS: SLACK(SL) & CARGAS(B1)

SEQ NO.	BARRAS NOME	NOMINAL UN / KV	U/KV (SL) P/MW (B1)	FA/GRAU Q/MVAR <TIP>	SLACK	Z=C-O-N-S-T-A-N-T P/MW	Q/MVAR
1	SLK_02	13.000	13.000	0.000	SLACK		
1	SUB_05	13.000	0.000	0.000	<S>	1.500	0.929
2	SUB_06	13.000	0.000	0.000	<S>	0.900	0.558
3	SUB_08	13.000	0.000	0.000	<S>	1.100	0.682

LISTA DE RAMOS: LINHAS(L1) & TRANSFORMADORES(T1, COM P(FE)/S(FE)=0.075)

SEQ NO.	DA BARRA	PARA BARRA	R/OHM	X/OHM	G/MUS(L1)C/MUF	G/MUS(T1)B/MUS	TRAFD-TAPES(RT) BARRA	U(RT)/%
1	SLK_02	DIJ_02	0.000	0.000	0.000	0.000	L1	
2	DIJ_02	SUB_05	1.000	1.300	0.000	0.000	L1	
3	SUB_05	CNF_02	1.300	2.000	0.000	0.000	L1	
4	CNF_02	PTL_01	1.000	1.300	0.000	0.000	L1	
5	PTL_01	SUB_06	2.000	2.700	0.000	0.000	L1	
6	SUB_06	CNA_02	1.500	0.700	0.000	0.000	L1	
7	PTL_01	CNF_03	0.100	0.120	0.000	0.000	L1	
8	CNF_03	SUB_08	1.300	2.000	0.000	0.000	L1	
9	SUB_08	CNA#01	1.200	0.300	0.000	0.000	L1	

MATRIZ DE ADMITANCA MONTADA,
 SIMULACAO TERMINADA,
 REDUCAO TERMINADA,
 DEPOIS A 0. ITERACAO TERMINADA

*** FLUXO DE CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SUBSISTEMA 2

NOME U/NOMIN	TENSAO DA BARRA	I <CARGAS> I CONNEXDES	FLUXO DE CARGA DE E PARA OUTRAS BARRAS				
			P/MW	Q/MVAR	S/MVA	P/S	FA/G
SLK_02	0.00 13.800 13.80	GRI DIJ_02 L KVI PUI	3.22	2.11	3.85	0.836	33.2
SUB_05	-0.65 13.368 13.80	GRI <Z> KVI PUI	1.41	0.87	1.66	0.850	31.8
		I DIJ_02 L	-3.15	-2.01	3.73	-0.843	32.6
		I CNF_02 L	1.74	1.14	2.08	0.836	33.2
SUB_06	-2.08 12.571 13.80	GRI <Z> KVI PUI	0.75	0.46	0.88	0.850	31.8
		I PTL_01 L	-0.75	-0.46	0.88	-0.850	31.8
		I CNA_02 L	0.00	0.00	0.00	0.390	-67.1
SUB_08	-2.10 12.592 13.80	GRI <Z> KVI PUI	0.92	0.57	1.08	0.850	31.8
		I CNF_03 L	-0.92	-0.57	1.08	-0.850	31.8
		I CNA_01 L	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0
DIJ_02	0.00 13.800 13.80	GRI KVI PUI					
		I SLK_02 L	-3.22	-2.11	3.85	-0.836	33.2
		I SUB_05 L	3.22	2.11	3.85	0.836	33.2
CNF_02	-1.30 13.030 13.80	GRI KVI PUI					
		I SUB_05 L	-1.71	-1.09	2.03	-0.843	32.6
		I PTL_01 L	1.71	1.09	2.03	0.843	32.6
PTL_01	-1.69 12.790 13.80	GRI KVI PUI					
		I CNF_02 L	-1.68	-1.06	1.99	-0.846	32.2
		I SUB_06 L	0.76	0.48	0.89	0.846	32.2
		I CNF_03 L	0.93	0.58	1.09	0.846	32.2
CNA_02	-2.08 12.571 13.80	GRI KVI PUI					
		I SUB_06 L	0.00	0.00	0.00	-0.390	-67.1

*** FLUXO_DE_CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SUBSISTEMA 2

NOME U/NOMIN	TENSAO DA BARRA	I <CARGAS>E I CONNEXOES	FLUXO DE CARGA DE E PARA OUTRAS BARRAS					
			P/MW	Q/MVAR	S/MVA	P/S	FA/G	
		-1.71 GRI						
CNF_03	12.777 KVI							
13.80	0.9259 PUI							
		I PTL_01 L	-0.93	-0.58	1.09	-0.846	32.2	
		I SUB_08 L	0.93	0.58	1.09	0.846	32.2	
		-2.10 GRI						
CNA#01	12.592 KVI							
13.80	0.9125 PUI							
		I SUB_08 L	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	

E considerando-se apenas o subsistema 3, tem-se:

*** FLUXO_DE_CARGA PQS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SUBSISTEMA 3

LISTA DE BARRAS: SLACK(SL) & CARGAS(B1)

SEQ NO.	BARRAS NOME	NOMINAL UN / KV	U/KV (SL) P/MW (B1)	FA/GRAU Q/MVAR <TIP>	SLACK	Z=C-O-N-S-T-A-N-T P/MW	Q/MVAR
1	SLK_03	13.800	13.800	0.000	SLACK		
1	SUB_11	13.800	0.000	0.000	<S>	0.600	0.372
2	SUB_12	13.800	0.000	0.000	<S>	1.500	0.929

LISTA DE RAMOS: LINHAS(L1) & TRANSFORMADORES(T1, COM P(FE)/S(FE)=0.075)

SEQ DA NO. BARRA	PARA BARRA	R/OHM	X/OHM	G/MUS(L1)C/MUF	G/MUS(T1)B/MUS	TRAF0-TAPES(RT) BARRA	U(RT)/Z
1	SLK_03 DIJ_03	0.000	0.000	0.000	0.000	L1	
2	DIJ_03 SUB_11	1.300	1.600	0.000	0.000	L1	
3	SUB_11 CNF_04	1.000	1.700	0.000	0.000	L1	
4	CNF_04 SUB_12	2.000	2.700	0.000	0.000	L1	
5	SUB_12 CNA#02	1.100	2.000	0.000	0.000	L1	

MATRIZ DE ADMITANCA MONTADA,
 SIMULACAO TERMINADA,
 REDUCAO TERMINADA,
 DEPOIS A 0. ITERACAO TERMINADA

*** FLUXO DE CARGA POS: VERSAO PARO O GSP/DEE/CCT/UFPB 11/1988 FLUXO.LFN ***
 Teste do fluxo PEGASUS com LFN - SUBSISTEMA 3

NOME U/NOMIN	TENSÃO DA BARRA	I <CARGAS>E I CONEXÕES	FLUXO DE CARGA DE E PARA OUTRAS BARRAS				
			P/MW	Q/MVAR	S/MVA	P/S	FA/G
	0.00	GRI DIJ_03 L	1.96	1.27	2.34	0.839	33.0
SLK_03	13.800	KVI					
13.80	1.0000	PUI					
	-0.46	GRI					
SUB_11	13.468	KVI <Z>	0.57	0.35	0.67	0.850	31.8
13.80	0.9760	PUI					
		I DIJ_03 L	-1.92	-1.23	2.28	-0.843	32.6
		I CNF_04 L	1.35	0.87	1.61	0.840	32.9
	-1.55	GRI					
SUB_12	12.885	KVI <Z>	1.31	0.81	1.54	0.850	31.8
13.80	0.9337	PUI					
		I CNF_04 L	-1.31	-0.81	1.54	-0.850	31.8
		I CNA#02 L	0.00	0.00	0.00	-0.863	-30.4
	0.00	GRI					
DIJ_03	13.800	KVI					
13.80	1.0000	PUI					
		I SLK_03 L	-1.96	-1.27	2.34	-0.839	33.0
		I SUB_11 L	1.96	1.27	2.34	0.839	33.0
	-0.91	GRI					
CNF_04	13.250	KVI					
13.80	0.9607	PUI					
		I SUB_11 L	-1.34	-0.85	1.58	-0.844	32.4
		I SUB_12 L	1.34	0.85	1.58	0.844	32.4
	-1.55	GRI					
CNA#02	12.885	KVI					
13.80	0.9337	PUI					
		I SUB_12 L	0.00	0.00	0.00	-0.338	70.3

Observando-se os resultados obtidos acima e concentrando a atenção para os valores de tensão e fluxo de potência, e implicitamente corrente, uma vez que $S = VI^*$. Pode-se observar que não há nenhuma diferença entre os valores obtidos através do processamento dos subsistemas individuais e do sistema total composto pelos três subsistemas acoplados.

2.3.3 Modelagem matemática para os dispositivos de proteção

Na Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) realizou-se um estudo com o objetivo básico de possibilitar que a atividade de coordenação da proteção, desenvolvida nos setores de planejamento e operação, fosse automatizada a partir da modelagem matemática para atuação dos dispositivos.

O modelo matemático foi obtido com a aplicação da regressão linear, utilizando-se o critério dos mínimos quadrados.

2.3.4 Critério dos mínimos quadrados

Seja $y = f(x)$ uma função real, contínua e de derivadas contínuas, proposta como modelo para representar um conjunto de n pontos, (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , ..., (X_n, Y_n) . A função $f(x)$ possui m parâmetros a_j , $j = 1, 2, \dots, m$, que devem ser estimados de acordo com o critério dos mínimos quadrados.

Tomando-se as diferenças entre o valor numérico da função para $x = X_i$ e as medidas Y_i , $i = 1, 2, \dots, n$, tem-se:

$$f(X_i) - Y_i = R_i$$

Onde R_i são os resíduos, aos quais aplica-se o critério dos mínimos quadrados do qual resulta a determinação dos parâmetros da função $y = f(x)$, que tornam mínima a soma dos quadrados dos resíduos:

$$\min \sum_{i=1}^n R_i^2 = g(a)$$

A condição acima se traduz no seguinte sistema de equações cuja solução são as estimativas dos m parâmetros da função:

$$\frac{\delta g(a)}{\delta a_j} = 0$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

As características dos dispositivos de proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos podem ser representadas no plano tempo X corrente por curvas geralmente do tipo inverso, ou seja, quanto maior a corrente menor será o tempo de atuação do dispositivo protetor, o que induz a optar-se por uma das funções elementares: linear, geométrica, exponencial, logarítmica ou hiperbólica, conforme figura abaixo. As escalas de tempo e corrente, usualmente utilizadas, são logarítmicas.

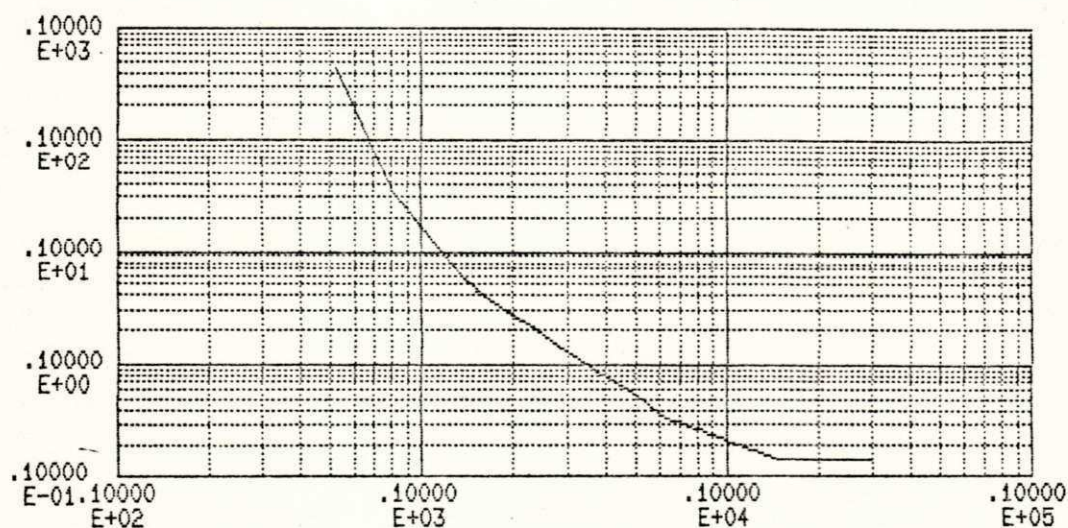


Figura 2.5 - Curva típica de um dispositivo protetor

Essas funções além de permitirem a relação decrescente, linearizam-se segundo transformações adequadas, possibilitando facilmente o uso do modelo adotado, como pode ser observado:

a) Função linear: $y = a + bx$

$$\min \sum [a + bX_i - Y_i]^2 = \min [g(a,b)]$$

$$\frac{\delta g(a,b)}{\delta a} = 0 \qquad \frac{\delta g(a,b)}{\delta b} = 0$$

* Para simplificar a notação omitiu-se o índice "i", assim é

que $\sum_{i=1}^n$ é representado por Σ .

$$\frac{\delta g(a,b)}{\delta a} = \sum 2(a + bX_i - Y_i) * 1 = 0$$

$$\sum (a + bX_i - Y_i) = 0$$

$$\sum a + \sum bX_i - \sum Y_i = 0 \implies na - \sum Y_i + b \sum X_i = 0 \quad (i)$$

$$\frac{\delta g(a,b)}{\delta b} = \sum 2(a + bX_i - Y_i) * X_i = 0$$

$$\sum (a + bX_i - Y_i) X_i = 0 \implies \sum (aX_i + bX_i^2 - X_iY_i) = 0$$

$$a \sum X_i + b \sum X_i^2 - \sum X_iY_i = 0 \quad (ii)$$

De (i) e (ii), obtem-se:

$$na - \sum Y_i + b \sum X_i = 0 \implies a = \frac{\sum Y_i - b \sum X_i}{n}$$

$$a \sum X_i - \sum X_iY_i + b \sum X_i^2 = 0$$

$$\left[\frac{\sum Y_i - b \sum X_i}{n} \right] \sum X_i - \sum X_iY_i = -b \sum X_i^2$$

$$\frac{\sum X_i \sum Y_i - b (\sum X_i)^2}{n} - \sum X_iY_i = -b \sum X_i^2$$

$$\frac{\sum X_i \sum Y_i}{n} - \sum X_iY_i = -b \sum X_i^2 + \frac{b (\sum X_i)^2}{n}$$

$$\frac{\sum X_i \sum Y_i}{n} - \sum X_iY_i = \frac{b [-n \sum X_i^2 + (\sum X_i)^2]}{n}$$

$$\sum X_i \sum Y_i - n \sum X_iY_i = b [-n \sum X_i^2 + (\sum X_i)^2]$$

$$b = \frac{\sum X_i \sum Y_i - n \sum X_iY_i}{-n \sum X_i^2 + (\sum X_i)^2} = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2.1.1)$$

$$a = \frac{\sum Y_i}{n} - \left[\frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \right] \frac{\sum X_i}{n}$$

$$na = \sum Y_i + \left[\frac{\sum Y_i (\sum X_i)^2 - n \sum X_i \sum X_i Y_i}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \right]$$

$$na = \frac{n \sum X_i^2 \sum Y_i - \sum Y_i (\sum X_i)^2 + \sum Y_i (\sum X_i)^2 - n \sum X_i \sum X_i Y_i}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{\sum X^2 \sum Y - \sum X \sum XY}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2.1.2)$$

b) Função geométrica: $y = a x^b$

Aplicando-se logaritmo à equação, tem-se que:

$$\ln y = \ln a + b * \ln x$$

$$\text{Fazendo-se: } Y = \ln y \quad ; \quad X = \ln x$$

$$A = \ln a \quad ; \quad B = b$$

Tem-se a equação acima na forma $Y = A + BX$, cujas constantes A e B são determinadas mediante aplicação das equações (2.1), permitindo a definição dos valores de a e b ,

$$a = e^A$$

$$b = e^B$$

c) Função exponencial: $y = a b^x$

Aplicando-se logaritmo à equação, tem-se que:

$$\ln y = \ln a + x * \ln b$$

$$\text{Fazendo-se: } Y = \ln y \quad ; \quad X = x$$

$$A = \ln a \quad ; \quad B = \ln b$$

Tem-se a equação acima na forma $Y = A + BX$, cujas constantes A e B são determinadas mediante aplicação das equações (2.1), permitindo a definição dos valores de a e b ,

$$a = e^A$$

$$b = e^B$$

d) Função logarítmica: $y = a + b * \ln x$

$$\text{Fazendo-se: } Y = y \quad ; \quad X = \ln x$$

$$A = a \quad ; \quad B = b$$

$$\text{Obtem-se: } Y = A + BX$$

Determinando-se as constantes mediante aplicação das equações (2.1), tem-se a definição dos valores de a e b .

$$a = A$$

$$b = B$$

$$e) \text{ Função hiperbólica: } \frac{1}{y} = a + bx$$

$$\text{Fazendo-se: } Y = \frac{1}{y} \quad ; \quad X = x$$

$$A = a \quad ; \quad B = b$$

Analogamente aos casos acima, tem-se:

$$Y = A + BX$$

$$a = A$$

$$b = B$$

2.3.5 Resultados obtidos

Para a definição da função mais compatível com o conjunto de pontos de uma determinada curva, realizaram-se avaliações mediante comparações entre os valores coletados e os respectivos valores calculados pelas diversas funções, observando-se os desvios relativos e os desvios padrões.

Dentre os principais dispositivos de proteção utilizados no sistema de distribuição da CELPE, apenas alguns modelos são utilizados por PEGASUS, sendo regidos pelas seguintes equações:

Elos fusíveis - Tempo Total de Interrupção.

I - corrente através do dispositivo.

12 K :

$36 \leq I \leq 50$	$t = 1.072 * 10^{11} * I^{-6.2448}$
$50 < I \leq 80$	$t = 3.985 * 10^5 * I^{-3.0596}$
$80 < I \leq 350$	$t = 1.598 * 10^3 * I^{-1.8058}$
$350 < I \leq 1000$	$t = 1.196 * 10 * I^{-0.9781}$
$I > 1000$	$t = 0.0139$

15 K :

$40 \leq I \leq 53$	$t = 1.152 * 10^{15} * I^{-8.2604}$
$53 < I \leq 90$	$t = 5.068 * 10^7 * I^{-4.0044}$
$90 < I \leq 450$	$t = 4.769 * 10^3 * I^{-1.9494}$
$450 < I \leq 1100$	$t = 7.177 * I^{-0.8886}$
$I > 1100$	$t = 0.0142$

20 K :

$52 \leq I \leq 76$	$t = 2.040 * 10^{12} * I^{-6.2135}$
$76 < I < 150$	$t = 7.496 * 10^6 * I^{-3.3309}$
$150 \leq I \leq 600$	$t = 2.894 * 10^3 * I^{-1.7561}$
$600 < I \leq 1500$	$t = 2.372 * 10 * I^{-1.0132}$
$I > 1500$	$t = 0.0143$

25 K :

$66 \leq I \leq 82$	$t = 2.856 * 10^{14} * I^{-7.1781}$
$82 < I < 150$	$t = 3.576 * 10^7 * I^{-3.5744}$
$150 \leq I \leq 700$	$t = 5.331 * 10^3 * I^{-1.8103}$
$700 < I \leq 1900$	$t = 1.656 * 10 * I^{-0.9392}$
$I > 1900$	$t = 0.0137$

30 K :

$$100 \leq I \leq 160 \quad t = 8.949 * 10^8 * I^{-3.9916}$$

$$160 < I < 330 \quad t = 2.118 * 10^5 * I^{-2.3568}$$

$$330 < I \leq 2500 \quad t = \frac{1}{-7.0159 + 0.0316 * I}$$

$$I > 2500 \quad t = 0.0138$$

40 K :

$$10 \leq I \leq 150 \quad t = 1.197 * 10^{16} * I^{-7.1047}$$

$$50 < I \leq 250 \quad t = 3.408 * 10^8 * I^{-3.6394}$$

$$250 < I \leq 1200 \quad t = 1.764 * 10^4 * I^{-1.8557}$$

$$1200 < I \leq 3000 \quad t = 2.250 * 10 * I^{-0.9223}$$

$$I > 3000 \quad t = 0.0139$$

50 K :

$$140 \leq I \leq 165 \quad t = 3.434 * 10^5 * 0.9410^I$$

$$165 < I \leq 230 \quad t = 2.801 * 10^{12} * I^{-5.1016}$$

$$230 < I \leq 350 \quad t = \frac{1}{-1.9536 + 0.01 * I}$$

$$350 < I \leq 1600 \quad t = 2.543 * 10^4 * I^{-1.8253}$$

$$1600 < I \leq 4200 \quad t = 3.763 * 10 * I^{-0.9487}$$

$$I > 4200 \quad t = 0.0137$$

65 K :

$$200 \leq I \leq 250 \quad t = 4.028 * 10^{15} * I^{-6.2842}$$

$$250 < I < 400 \quad t = 9.618 * 10^8 * I^{-3.5305}$$

$$400 \leq I \leq 1800 \quad t = 5.010 * 10^4 * I^{-1.8804}$$

$$1800 < I \leq 4900 \quad t = 4.328 * 10 * I^{-0.9495}$$

$$I > 4900 \quad t = 0.0135$$

80 K :

$210 \leq I \leq 350$	$t = 6.218 * 10^{14} * I^{-5.5445}$
$350 < I < 620$	$t = 1.377 * 10^{10} * I^{-3.7306}$
$620 \leq I \leq 2400$	$t = 1.030 * 10^5 * I^{-1.8912}$
$2400 < I \leq 6230$	$t = 2.283 * 10^2 * I^{-1.1062}$
$I > 6230$	$t = 0.0144$

- Relés - Tipo CO-8

M - Múltiplo da corrente de ajuste.

CURVA 0.5

$1.5 \leq M \leq 4$	$t = \frac{1}{-1.7733 + 1.5577 * M}$
$4 < M < 13$	$t = \frac{1}{-2.1262 + 1.8055 * M}$
$13 \leq M \leq 20$	$t = 0.1867 * M^{-0.5162}$
$M > 20$	$t = 0.4000$

CURVA 1

$1.5 \leq M < 4$	$t = 9.9920 * M^{-2.2493}$
$4 \leq M < 11$	$t = 1.3140 * M^{-0.7771}$
$11 \leq M \leq 20$	$t = 0.9463 * M^{-0.6299}$
$M > 20$	$t = 0.1430$

CURVA 2

$$1.7 \leq M \leq 6 \quad t = \frac{1}{-0.3860 + 0.3278 * M}$$

$$6 < M \leq 20 \quad t = 1.6160 * M^{-0.5366}$$

$$M > 20 \quad t = 0.3238$$

CURVA 3

$$1.8 \leq M \leq 6 \quad t = \frac{1}{-0.2618 + 0.2177 * M}$$

$$6 < M \leq 20 \quad t = 2.3390 * M^{-0.4987}$$

$$M > 20 \quad t = 0.5250$$

Para cada intensidade de corrente, PEGASUS calcula o tempo de atuação do dispositivo. Entretanto, se o valor de corrente for menor que o limite inferior da equação regente é obtido um tempo da ordem de 10^{38} s, ou seja, a continuação da operação normal do dispositivo em análise.

As equações que simulam a atuação dos dispositivos de proteção fornecem apenas o tempo de interrupção do equipamento. PEGASUS por sua vez, verifica em qual dos dispositivos este tempo é menor e realiza uma abertura coordenada.

2.4 Resolução do circuito elétrico

Como ilustração considere o circuito mostrado na figura 2.5 que contém cinco nós, onde os nós 4 e 5 são simples e 1, 2 e 3 são nós principais. A conexão de dois ou mais elementos de circuito cria uma junção chamada nó. A junção de dois elementos é um nó simples; a de três ou mais elementos é um nó principal.

O método utilizado corresponde ao *Método da Tensão Nodal* [Edminister 1985]. Neste método, um dos nós principais é selecionado como referência e então, são descritas equações, baseadas na Lei das Correntes de Kirchhoff (LCK), para os outros nós principais. A cada um destes outros nós principais, é indicada uma tensão, onde deve ser entendido que esta é uma tensão em relação ao nó de referência. Estas tensões são as incógnitas e, quando determinadas pelo método apropriado, resultam na solução da rede.

O circuito é redesenhado na Fig. 2.6 e o nó 3 selecionado como a referência para as tensões V_1 e V_2 . A LCK requer que a corrente total para fora do nó seja zero:

$$\frac{V_1 - V_a}{Z_A} + \frac{V_1}{Z_B} + \frac{V_1 - V_2}{Z_C} = 0$$

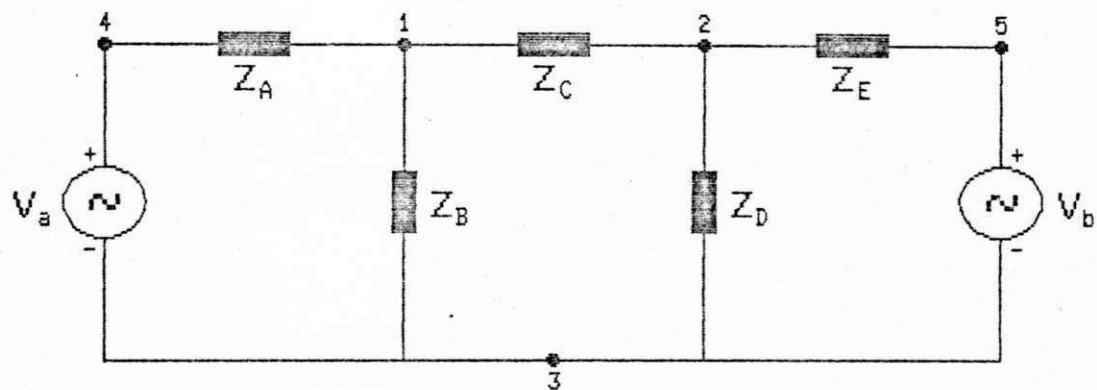


Figura 2.6 - Circuito elétrico com 5 nós

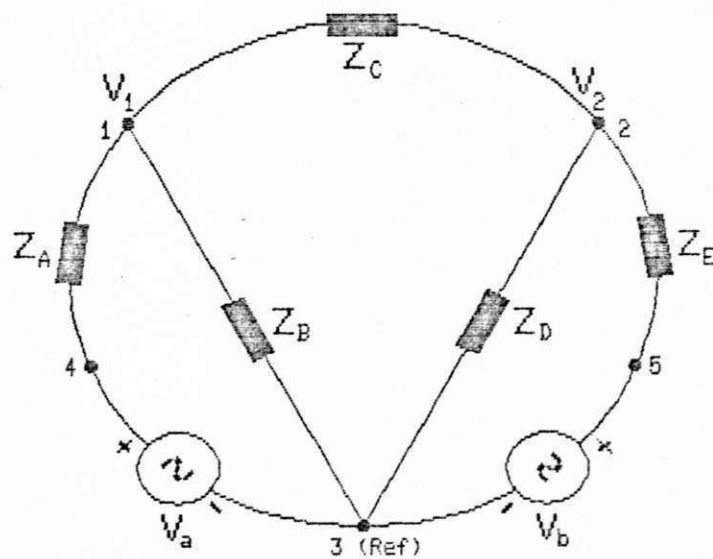


Figura 2.7 - Ênfatização do nó de referência

Igualmente, a corrente total para fora do nó 2 deve ser zero:

$$\frac{V_2 - V_1}{Z_C} + \frac{V_2}{Z_D} + \frac{V_2 - V_b}{Z_E} = 0$$

(Aplicando a LCK nesta forma não implica que todas as correntes atuais dos ramos sejam dirigidas para fora de ambos os nós. Realmente, a corrente no ramo 1-2 é necessariamente dirigida para fora de um nó e para dentro do outro).

Pondo as equações para V_1 e V_2 na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1/Z_A + 1/Z_B + 1/Z_C & -1/Z_C \\ -1/Z_C & 1/Z_C + 1/Z_D + 1/Z_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a/Z_A \\ V_b/Z_E \end{bmatrix}$$

Mas, como $Y = 1/Z$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} Y_A + Y_B + Y_C & -Y_C \\ -Y_C & Y_C + Y_D + Y_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a * Y_A \\ V_b * Y_E \end{bmatrix}$$

$$[Y] [V] = [I] \quad (I)$$

Deve-se então, observar as seguintes características das matrizes acima:

* Matriz Admitância [Y]:

- (i) Possui ordem $n \times n$, onde n representa a ordem do sistema.
- (ii) Apresenta simetria em relação a diagonal principal, $Y_{ik} = Y_{ki}$.
- (iii) Possui estrutura complexa ($\text{Re}(Y), \text{Im}(Y)$).
- (iv) Cada elemento fora da diagonal (admitância mútua), Y_{ki} , é composto pela soma de todas as admitâncias individuais interligando os nós i e k com o sinal trocado.
- (v) Cada elemento da diagonal (admitância própria), Y_{kk} , é composto pela soma de todas as admitâncias individuais conectadas ao nó k .
- (vi) Nos sistemas práticos, sobretudo de distribuição, não existem ligações entre todas as barras do sistema conduzindo a uma matriz Y esparsa.
- (vii) A impedância série da linha de transmissão é considerada na admitância mútua como $Y_{ser} = 1/Z_{ser}$.
- (viii) As cargas representadas por impedância constante são consideradas na admitância própria.

* Matriz Corrente [I]:

$$I_k \equiv \Sigma (\text{corrente que vai para o nó } k) \quad (k=1,2,\dots,n)$$

na qual a corrente que sai do nó k é considerada como negativa.

Para a resolução do sistema de equações (I) foram desenvolvidas rotinas considerando-se o critério de esparsidade da matriz Y . As rotinas desenvolvidas basearam-se no método da Bi-Fatoração, [Zollenkopf 1971]. Uma explanação genérica sobre este método encontra-se no Anexo I.

2.4.1 Cálculo das correntes

Após ter-se obtido o valor da tensão em todos os nós do sistema, a corrente em uma linha qualquer que possua uma admitância shunt desprezível, pode ser calculada como segue

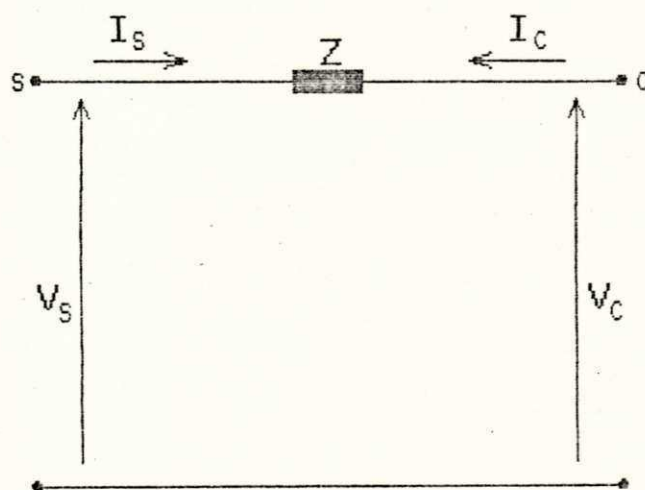


Figura 2.8 - Representação da linha de transmissão

De acordo com a lei dos nós que afirma que para qualquer circuito elétrico concentrado, para qualquer de seus nós, e a qualquer instante a soma algébrica de todas as correntes de braço saindo de um nó é zero, tem-se para o nó s :

$$I_s - I_c = 0$$

$$\therefore I_s = I_c$$

Pela lei de Ohm,

$$V = ZI \quad \therefore I = V / Z$$

onde V representa a tensão aplicada ao dispositivo, Z a impedância e I a intensidade da corrente.

$$I = I_s = I_c = \frac{V_B - V_C}{Z}$$

ou, como $Y = 1/Z$, onde Y representa a admitância da linha, obtem-se:

$$I = (V_B - V_C) * Y$$

2.5 Formação do Diagrama Unifilar

Foram desenvolvidas rotinas específicas para montagem dos diagramas unifilares à partir das posições dos barramentos e das linhas de transmissão.

Após terem sido obtidas à partir do banco de dados todas as informações correspondentes às posições das barras e linhas de transmissão, como também as interligações existentes e as posições relativas das chaves normalmente abertas e fechadas, PEGASUS principia a formulação de tabelas que irão auxiliar posteriormente no processamento do módulo de Curto-circuito.

A princípio são estabelecidas as áreas de desenho do diagrama unifilar e de informações ao usuário. O desenho dos barramentos e linhas de transmissão é baseado nas coordenadas especificadas.

À partir das posições das chaves normalmente fechadas, PEGASUS estabelece diversos subtrechos correspondentes a uma parte da linha de transmissão encontrada entre duas chaves consecutivas, formando também uma outra tabela que contém o número dos subtrechos que irão formar um único trecho se assim o diagrama exigir. Um trecho pode conter um ou mais subtrechos dependendo da situação estabelecida.

Para o Diagrama Unifilar exibido na figura 2.1, são mostrados abaixo os resultados obtidos através do processamento de PEGASUS para indicação dos trechos e subtrechos. Estes resultados, que podem ser armazenados em um arquivo, constituem uma forma de auxílio ao usuário na formação do banco de dados com as informações necessárias ao Fluxo de Carga.

Numero de Linhas = 8

Num	Posicoes das linhas(x1,x2,y1,y2)			
001	315.000	315.000	92.000	192.000
002	315.000	400.000	192.000	192.000
003	400.000	400.000	192.000	200.000
004	172.000	560.000	326.000	326.000
005	560.000	560.000	316.000	326.000
006	400.000	400.000	215.000	326.000
007	560.000	628.000	211.000	211.000
008	560.000	560.000	211.000	301.000

Num	12345	Conexoes
L2 001	00001	0020000000000000
L2 002	00000	0010030000000000
L2 003	00000	0020000000000000
L2 004	00100	0050060000000000
L2 005	00000	0040000000000000
L2 006	00001	0040000000000000
L2 007	10000	0000000000000000
L2 008	00000	0070000000000000

Numero de Chaves Normalmente Abertas = 2

NA 001 003006
NA 002 000005

Numero de chaves normalmente fechadas = 4

Estudo da linha = 1

Numero de subtrechos = 2

Subtrecho = 1	315.000	315.000	92.000	168.667	Chaves = 1	0
Subtrecho = 2	315.000	315.000	176.667	192.000	Chaves = 1	0

Estudo da linha = 2

Numero de subtrechos = 1

Subtrecho = 3 315.000 400.000 192.000 192.000 Chaves = 0 0

Estudo da linha = 3

Numero de subtrechos = 1

Subtrecho = 4 400.000 400.000 192.000 200.000 Chaves = 0 0

Estudo da linha = 4

Numero de subtrechos = 2

Subtrecho = 5 172.000 362.000 326.000 326.000 Chaves = 2 0

Subtrecho = 6 370.000 560.000 326.000 326.000 Chaves = 2 0

Estudo da linha = 5

Numero de subtrechos = 1

Subtrecho = 7 560.000 560.000 316.000 326.000 Chaves = 0 0

Estudo da linha = 6

Numero de subtrechos = 2

Subtrecho = 8 400.000 400.000 215.000 300.833 Chaves = 3 0

Subtrecho = 9 400.000 400.000 300.833 326.000 Chaves = 3 0

Estudo da linha = 7

Numero de subtrechos = 2

Subtrecho = 10 560.000 570.000 211.000 211.000 Chaves = 4 0

Subtrecho = 11 570.000 620.000 211.000 211.000 Chaves = 4 0

Estudo da linha = 8

Numero de subtrechos = 1

Subtrecho = 12 560.000 560.000 211.000 301.000 Chaves = 0 0

Numero de trechos = 7

trecho = 1 Subtrechos = 1 0 0 0 0 0

trecho = 2 Subtrechos = 2 3 4 0 0 0

trecho = 3 Subtrechos = 5 0 0 0 0 0

trecho = 4 Subtrechos = 6 7 9 0 0 0

trecho = 5 Subtrechos = 8 0 0 0 0 0

trecho = 6 Subtrechos = 10 12 0 0 0 0

trecho = 7 Subtrechos = 11 0 0 0 0 0

2.6 Utilização do simulador

Nesta seção será descrita de forma geral a utilização do simulador. Nos capítulos seguintes será discutida em detalhes a utilização do simulador para cada aplicação específica.

A utilização do simulador para realização da coordenação da proteção não introduz muita complexidade. Trata-se de um recurso computacional de grande potencialidade e seu emprego significa uma revolução dos aspectos da engenharia da proteção. As figuras mostradas abaixo permitem uma visualização global do sistema desenvolvido.



Figura 2.9 - Tela de abertura.

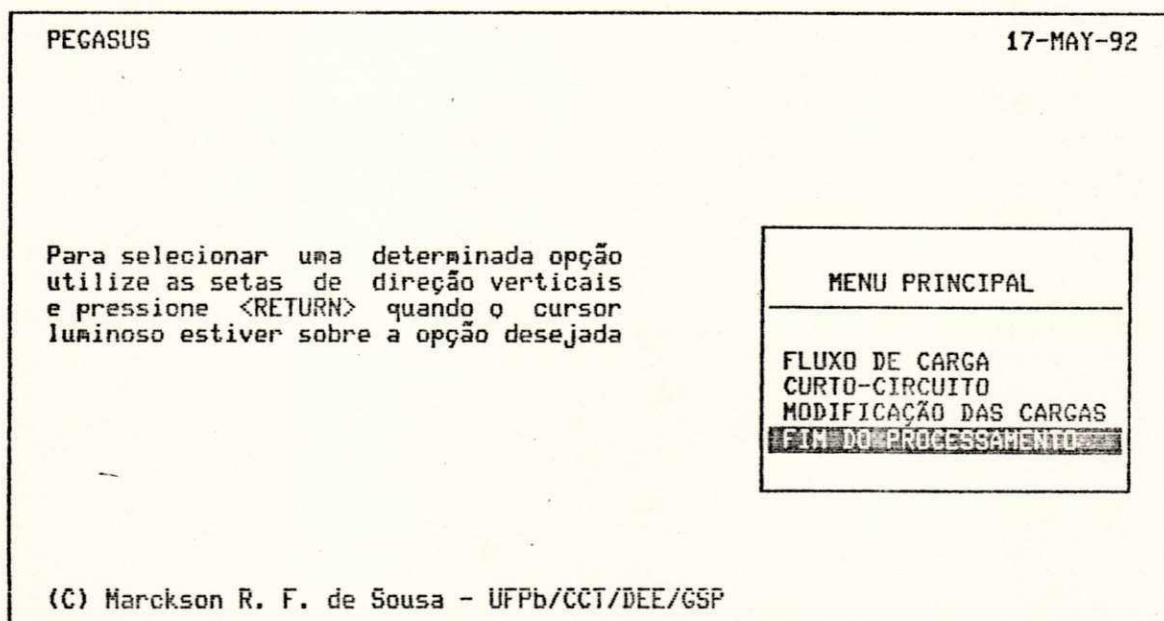


Figura 2.10 - Menu principal.

Pode-se observar que o simulador consiste basicamente de três módulos, sendo um deles destinado apenas a modificação das cargas do sistema e os outros dois destinados ao processo de treinamento da coordenação da proteção.

Durante a simulação três tipos de operação do sistema estão disponíveis:

- Fluxo de Carga
- Curto-circuito
- Fluxo de Carga Probabilístico

Todo o processo de simulação é conversacional e auto-instrutivo, não oferecendo qualquer dificuldade para seleção da opção desejada.

O simulador foi desenvolvido em um computador digital VAX 11-750 em linguagem FORTRAN 77, sendo utilizados ainda a linguagem VAX MACRO, linguagem de programação assembler para computadores VAX com sistema operacional VAX/VMS e o pacote gráfico ReGIS (Remote Graphics Instruction Set) para auxílio no que se refere a interface homem-máquina e ao desenho dos diagramas unifilares. Monitores coloridos foram utilizados para possibilitar um maior destaque de cada área de trabalho e para que com a utilização das cores se pudesse facilmente detectar mudanças no comportamento da rede.

Nos capítulos subsequentes, será apresentada uma descrição detalhada das funções envolvidas através da execução de exemplos.

3. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO NORMAL

3.1 *Introdução*

Em um SDEE duas grandezas são de fundamental importância: as tensões ao longo dos alimentadores e as correntes que circulam nos mesmos. Estas grandezas dependem fundamentalmente das cargas e da configuração do sistema. Utilizando-se o simulador no modo "Fluxo de Carga", a configuração do sistema é mantida fixa, e são analisadas a variação das tensões e correntes face a variações nas cargas.

Neste "modo" de operação do simulador podem ser realizados uma série de experimentos ilustrando a relação existente entre a carga e as tensões/correntes do sistema.

Um outro aspecto que a utilização deste "modo" de operação permite analisar é o comportamento aleatório das cargas. Como é sabido, a utilização de modelos probabilísticos para simulação de sistemas elétricos é cada vez mais intensa [Macedo 1989]. Esta situação, reflete apenas o reconhecimento de que a carga em um sistema

elétrico é uma variável não-determinística e portanto deve ser modelada como tal.

Neste capítulo, descreve-se o primeiro módulo do simulador, identificado na figura 3.1 mostrada abaixo e, que perfaz o processamento de um Fluxo de Carga Determinístico.

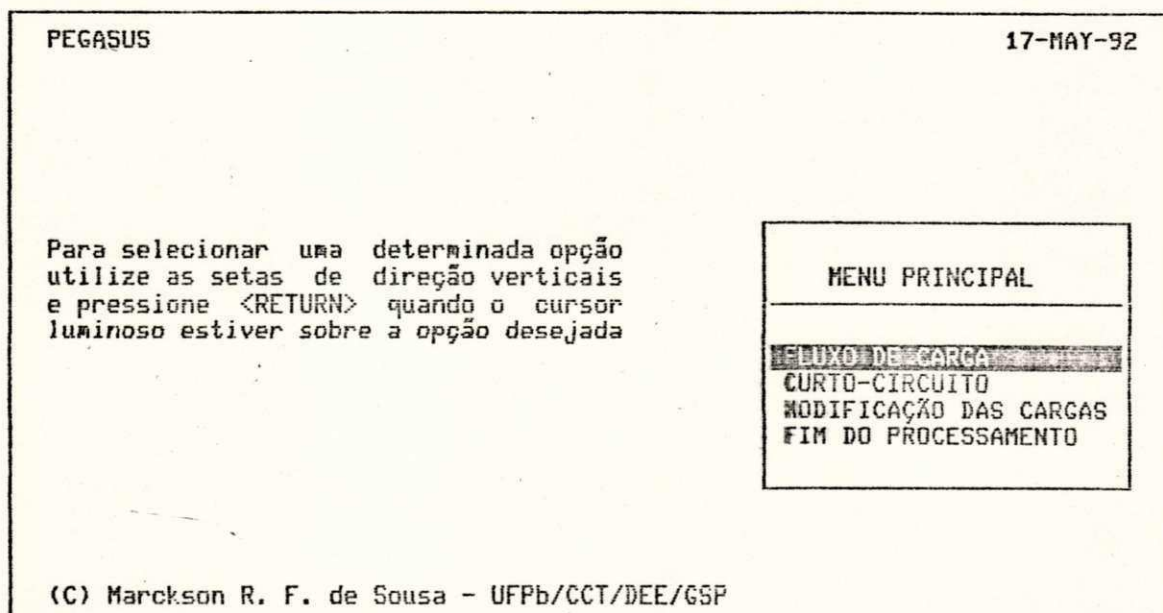


Figura 3.1 - Seleção da opção de Fluxo de Carga

A figura 3.2 apresenta o conjunto de informações que aparece no monitor, completando as informações necessárias para o uso do simulador. A figura 3.3 exhibe o diagrama unifilar do sistema.

OPERAÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO DE CARGA

De uma maneira geral, a necessidade de se utilizar modelos probabilísticos prende-se ao fato de que os dados a serem processados são de natureza não determinística. Por exemplo, no planejamento de sistemas de Energia Elétrica um dado fundamental é a demanda. Todavia é impossível se prever com precisão qual será o valor da demanda em determinado ponto do sistema com antecedência, principalmente em se tratando de redes de distribuição. Naturalmente, é impossível se prever com exatidão o que ocorrerá. Mas, a utilização de modelos probabilísticos permite a obtenção de um conjunto significativo de informações sobre o que poderá acontecer.

Este módulo realiza a simulação de novos valores de carga para cada novo processamento mantendo sempre uma regularidade estatística.

Verificando as variações de carga, tensão e corrente para cada processamento, você poderá adquirir sensibilidade suficiente para saber como uma rede de distribuição realmente opera.

Para continuar pressione <RETURN> ...

Figura 3.2 - Descrição do módulo de Fluxo de Carga

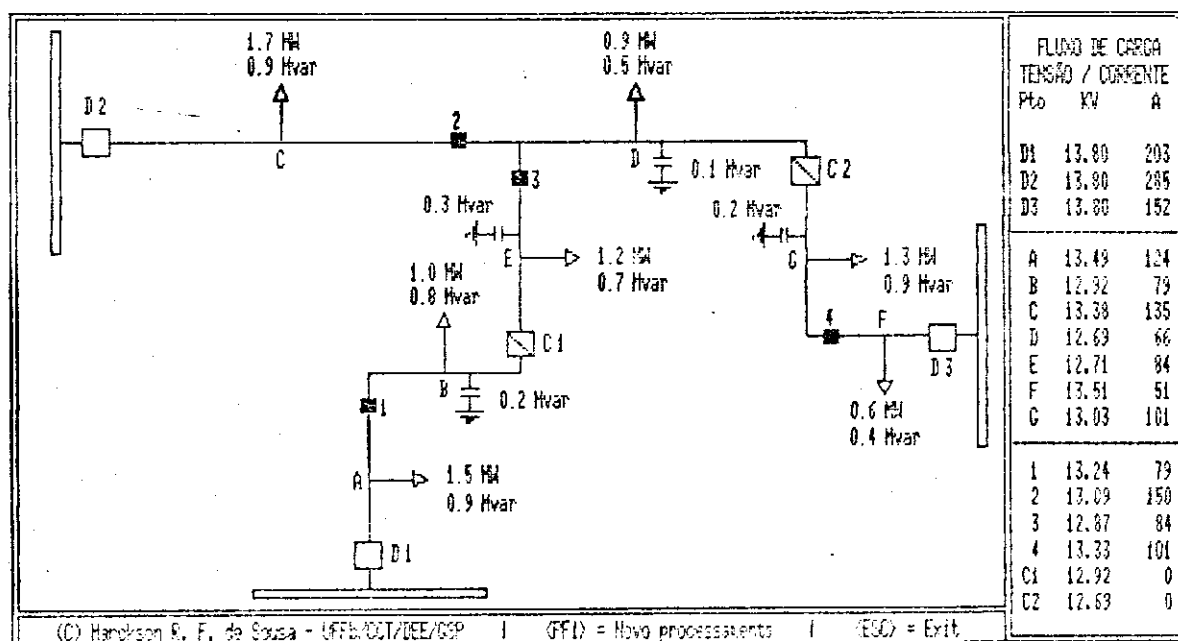


Figura 3.3 - Diagrama unifilar do sistema

A seguir, no texto são apresentados uma série de experimentos que objetivam ilustrar a utilização do simulador no modo "Fluxo de Carga".

3.2. *Simulação determinística*

Neste "modo" de utilização do simulador, o usuário pode realizar modificações no valor de cada uma das cargas do sistema, de forma interativa.

Os resultados obtidos para cada processamento do Fluxo de Carga são exibidos diretamente na tela do terminal, onde podem ser observadas as variações no valor das tensões/correntes em função de variações na carga.

Para os novos valores de carga gerados, observa-se que estes sobrepõem os antigos diretamente sobre o diagrama unifilar e os novos resultados obtidos (tensão e corrente) através do processamento do Fluxo de Carga são exibidos na parte reservada às informações também em sobreposição aos anteriores.

Abaixo é mostrado o resultado obtido para três simulações:

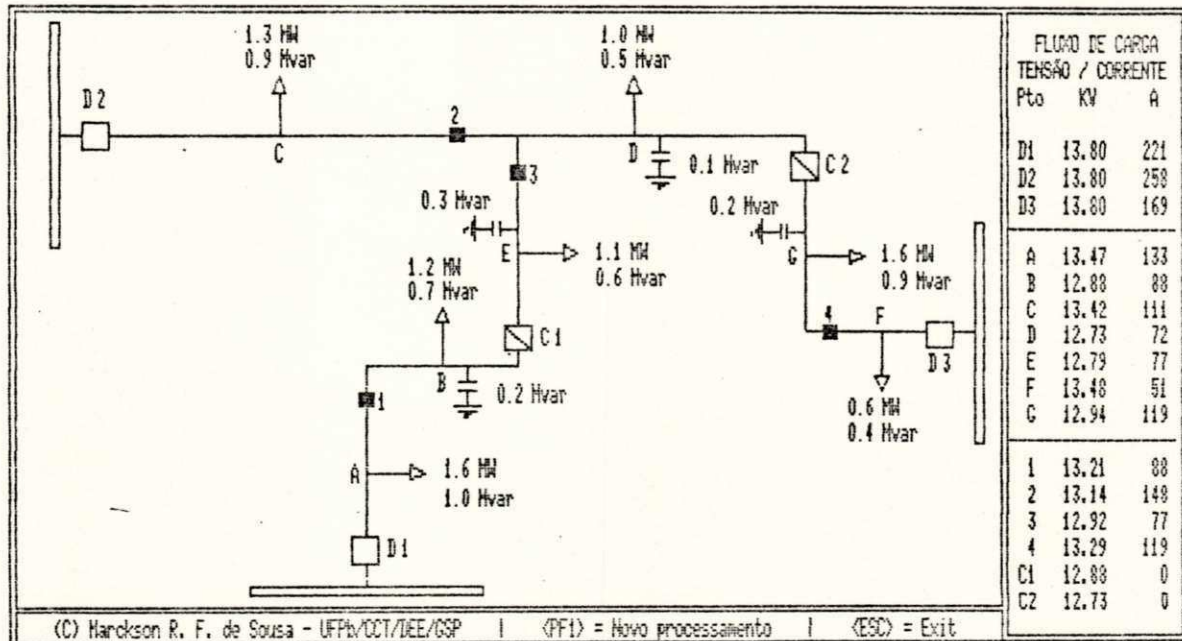


Figura 3.4(a) - Resultado da primeira simulação.

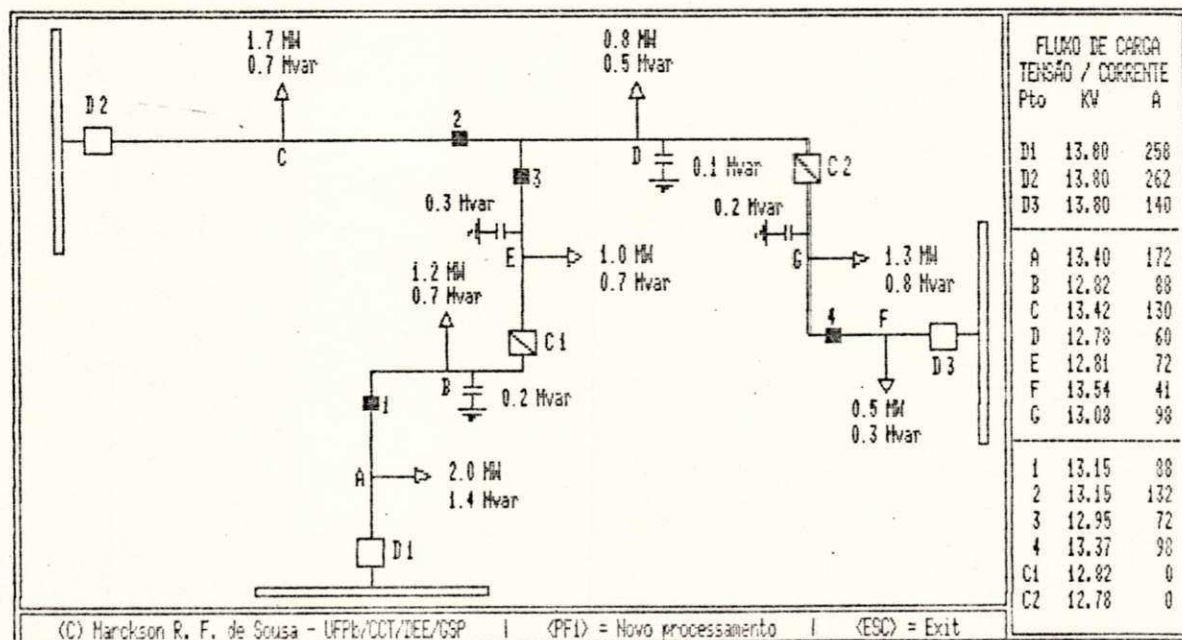


Figura 3.4(b) - Resultado da segunda simulação.

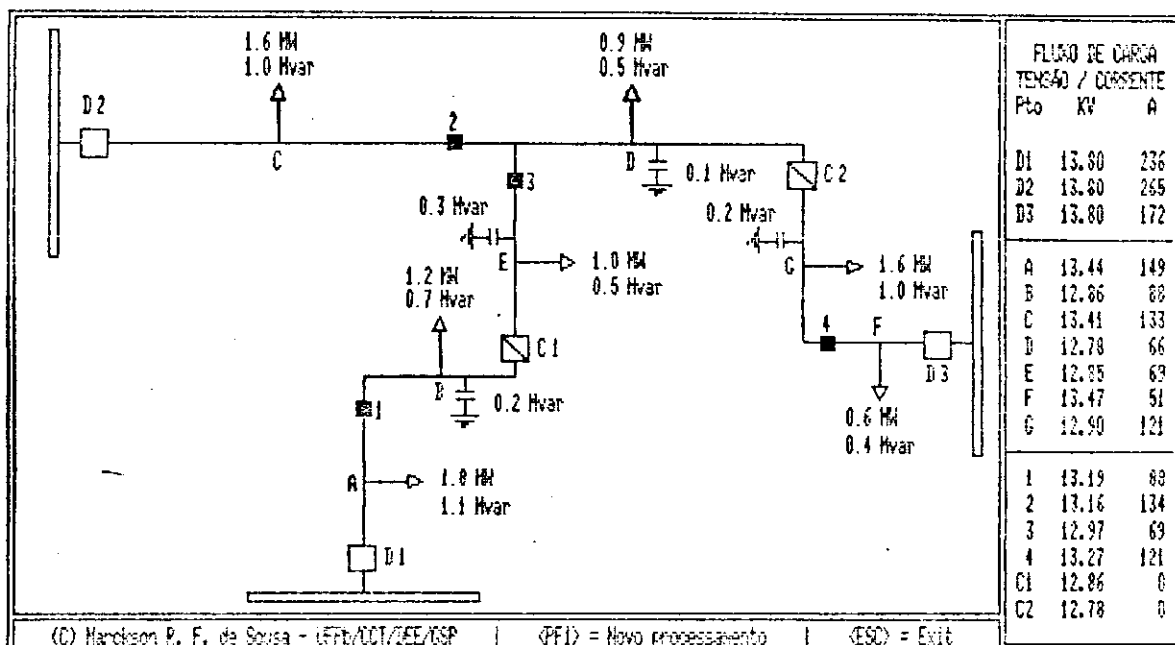


Figura 3.4(c) - Resultado da terceira simulação.

3.3 Simulação probabilística

O modo Fluxo de Carga também possibilita a realização de experimentos envolvendo a característica aleatória das cargas. A inclusão desta opção no simulador visa atingir dois objetivos básicos:

- Chamar a atenção do usuário para uma das características mais importantes das cargas em um SDEE, que é sua natureza probabilística.

- Familiarizar o usuário com relação a utilização de modelos probabilísticos para análise de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

Neste modelo, as cargas são representadas através de variáveis aleatórias normais (ou Gaussianas). A cada passo do processo de simulação é gerado um novo conjunto de cargas, obedecendo uma lei probabilística especificada bem como seus parâmetros definidos interativamente pelo usuário, através do módulo de modificação das cargas. A equação (3.1) representa a função densidade de probabilidade da carga P, onde a figura 3.5 apresenta o gráfico correspondente.

$$f_p(p) = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} \text{EXP} \left[- \frac{(p - \mu_p)^2}{2 \sigma_p^2} \right] \quad (3.1)$$

onde: p = variável aleatória que descreve a carga

μ_p = valor médio de P

σ_p = desvio padrão de P

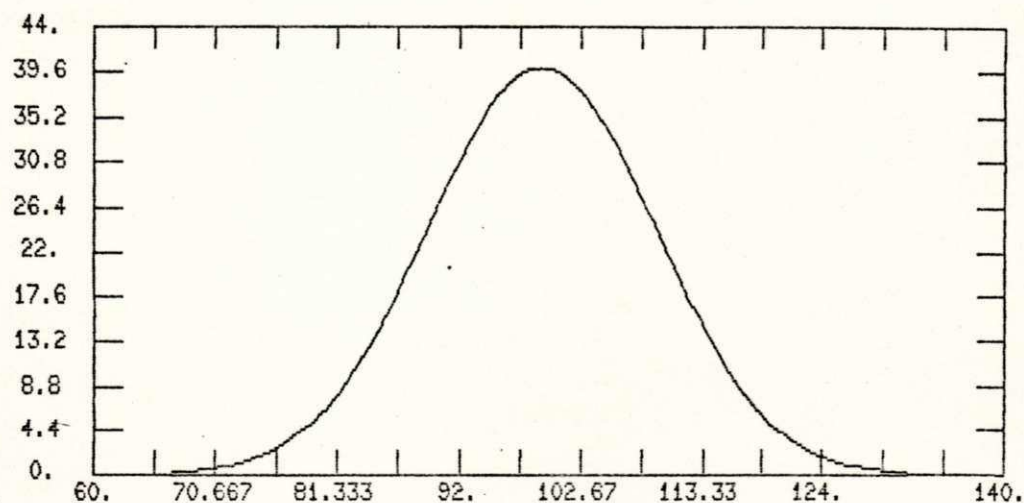


Figura 3.5 - Representação de carga com distribuição normal

A utilização de variáveis aleatórias normais para representar o comportamento da carga é baseado no fato de que a carga em cada barra de um SDEE é a somatória de um grande número de pequenas cargas, isto é:

$$P_t = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n$$

onde: p_1 = carga de cada um dos consumidores individuais

p_t = carga total da barra

n = nº de consumidores conectados a determinada barra

Deste modo, como a carga P_t é a soma de um grande número de cargas e conseqüentemente a variável aleatória p_t é a soma de um grande número de variáveis aleatórias, a distribuição de probabilidade de p_t tende para uma variável aleatória normal quando n cresce, segundo o teorema do limite central. Abaixo, são mostradas as cargas do sistema utilizado.

Carga	A	B	C	D	E	F	G
Valor esperado (MW)	1.800	1.200	1.500	0.900	1.100	0.600	1.500
(Mvar)	1.116	0.744	0.929	0.558	0.682	0.372	0.929
Desvio Padrão (%)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

Tabela 3.1 - Cargas: Valor esperado e desvio padrão.

Para a obtenção dos valores das cargas, é utilizado o método de Monte Carlo que é bastante simples e pode ser usado para solução de uma grande variedade de problemas. Aqui, sua aplicação consiste na geração de uma seqüência de números aleatórios, de acordo com uma distribuição especificada.

Para a geração dos números pseudo-aleatórios foram desenvolvidos programas computacionais. Deste modo é obtida

uma sequência de valores $\{C^{(1)}, C^{(2)}, \dots, C^{(n)}\}$, onde n representa o número de simulações.

Na tabela 3.2 são apresentados os resultados de 5 simulações.

Simulação	Carga						
	A	B	C	D	E	F	G
(MW) 1	1.7	1.0	1.3	0.9	1.0	0.5	1.6
(Mvar)	1.1	0.8	0.9	0.5	0.7	0.4	0.9
(MW) 2	1.5	1.2	1.3	1.0	1.1	0.6	1.4
(Mvar)	1.1	0.7	1.0	0.5	0.7	0.4	1.1
(MW) 3	2.1	1.3	1.3	0.9	1.2	0.7	1.3
(Mvar)	1.1	0.7	1.1	0.5	0.6	0.4	0.8
(MW) 4	1.9	1.2	1.5	0.7	1.2	0.5	1.3
(Mvar)	1.2	0.8	1.0	0.5	0.7	0.4	0.9
(MW) 5	1.6	1.2	1.5	0.8	1.2	0.8	1.5
(Mvar)	1.2	0.8	1.0	0.5	0.7	0.3	0.9

Tabela 3.2 - Resultado de 5 simulações.

Os resultados obtidos outrora/atualmente nas concessionárias de energia elétrica são quase sempre em forma de grandes relatórios, que tornam-se muitas vezes bastante confusos além de não causarem a perfeita correspondência do valor obtido com a localização do ponto no sistema.

Os resultados aqui exibidos estão dispostos sobre o próprio diagrama unifilar, permitindo um melhor entendimento dos resultados e maior conforto.

O porque de tudo isto baseia-se no velho jargão popular: "Uma figura vale mais que mil palavras".

4. SIMULAÇÃO DE FALTAS

4.1 *Introdução*

As interrupções no fornecimento de energia elétrica sempre foram motivos para polêmicas entre o fornecedor e o consumidor.

A continuidade de serviço representa para uma concessionária um dos seus objetivos, enquanto que as interrupções também provocam enormes prejuízos aos cofres da empresa que também não as deseja.

A função das redes de Distribuição de Energia Elétrica, assim como as linhas de transmissão é a de fornecer aos seus usuários uma tensão mais aproximada possível do seu valor prefixado.

Uma das maiores causas do não atendimento as premissas básicas mencionadas acima é indubitavelmente a ocorrência de um defeito no sistema, no presente caso um curto-circuito. Define-se como curto-circuito, todos os defeitos provocados por um contato entre um condutor alimentado e a terra (ou qualquer parte metálica unida a

ela) ou contato entre condutores.

Neste capítulo será explorado o curto-circuito monofásico, onde poderão ser observadas algumas de suas principais consequências, como também serão mostradas algumas das várias faces do sistema de proteção.

4.2 Proteção

4.2.1 Filosofia da Proteção

É a técnica de selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um sistema elétrico, de forma a guardar entre si uma determinada relação, tal que uma anormalidade no sistema possa ser isolada e removida, sem que as outras partes do mesmo sejam afetadas.

4.2.2 Finalidades da Proteção

As finalidades da proteção podem ser resumidas em dois itens:

a) Isolar a menor parte possível do sistema no caso de alguma falta, ou isolar o curto-circuito tão próximo quanto possível de sua origem.

b) Efetuar o isolamento do curto-circuito num tempo mínimo à fim de reduzir os danos aos condutores e equipamentos.

4.2.3 *Requisitos da Proteção*

Para a proteção atingir suas finalidades deverá atender a alguns requisitos:

a) *Seletividade*: A proteção deve somente isolar a parte do sistema atingida pelo defeito, mantendo a continuidade do serviço das demais partes do sistema.

b) *Rapidez*: As sobrecorrentes geradas pelos curtos-circuitos ou sobrecargas devem ser extintas no menor tempo possível, reduzindo a probabilidade de propagação dos defeitos.

c) *Sensibilidade*: A proteção deve ser suficientemente sensível a defeitos que possam ocorrer durante a operação do sistema. Por sensibilidade entende-se como o menor valor da grandeza capaz de ativar o dispositivo de proteção.

d) *Segurança*: O sistema de proteção não deve realizar uma falsa operação sob condições normais de operação, ou falhar no caso de faltas no sistema.

e) *Economia*: O sistema de proteção deve ter sua implantação viável economicamente, evitando-se um número excessivo de dispositivos de proteção.

4.2.4 Benefícios da Proteção

Um sistema de proteção devidamente projetado e ajustado apresenta inúmeras vantagens enumeradas abaixo:

- a) Menores danos aos materiais (condutores) e equipamentos (transformadores).
- b) Menores custos de manutenção (combustíveis, transporte, mão-de-obra, etc.).
- c) Maior vida útil dos materiais e equipamentos.
- d) Menos desligamentos.
- e) Maior segurança.
- f) Melhoria da imagem junto aos consumidores.
- g) Redução do número de desligamentos.
- h) Redução no tempo das interrupções.
- i) Aumento do faturamento.
- j) Facilidade na busca e pesquisa de defeito.
- k) Maior simplicidade e racionalização do sistema.
- l) Menor queima de elos em cascata.
- m) Facilidade de manobra.

4.3 Coordenação da Proteção

4.3.1 Filosofia da Coordenação

A presença de um curto-circuito numa rede elétrica tem como consequências:

- a) Aquecimento e avarias originadas pelo arco elétrico.
- b) Perigo para os operadores próximos a equipamentos como disjuntores, chaves fusíveis, etc., quando não dimensionados para a intensidade da corrente de defeito.
- c) Esforços eletrodinâmicos que podem afetar a estrutura de barras e conexões.
- d) Desequilíbrio das tensões e correntes nas três fases.
- e) Quedas de tensão elevadas que podem afetar o funcionamento de máquinas síncronas e assíncronas, pondo em perigo a estabilidade da rede.

Em termos gerais, coordenar uma proteção, é um processo pelo qual formamos uma sistemática no selecionamento dos equipamentos, baseados em critérios preestabelecidos de modo a que apenas o trecho defeituoso seja desconectado. Proporcionando a maior eficiência possível nas proposições abaixo:

- a) Rapidez na separação do circuito defeituoso.
- b) Permitir a continuidade de fornecimento nos trechos não defeituosos.
- c) Facilitar a localização do defeito.
- d) Obter mais baixo custo sem prejudicar a confiabilidade do sistema.

e) Permitir o restabelecimento do trecho defeituoso quando da ocorrência de um defeito transitório no mesmo, reduzindo assim o tempo de interrupção.

4.4 Dispositivos de interligação e proteção

Com o objetivo de proteção, PEGASUS utiliza basicamente os seguintes dispositivos:

- Fusíveis.
- Disjuntores.

Dentre as principais funções dos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos as utilizadas foram:

- *Interrupção*: deve interromper todos os curtos-circuitos dentro de sua capacidade nominal.
- *Capacidade de manobra*: deve ser capaz de manobrar sob correntes normais e anormais.
- *Desconexão do circuito*: deve ser capaz de abrir o circuito com carga ou sem carga.

FUSÍVEIS.

Os fusíveis são bastante utilizados numa faixa bastante ampla de tensões.

O fusível é um dispositivo de interrupção súbita e deve ser manualmente repostado para restaurar a operacionalidade do circuito. Existem vários tipos de fusíveis, cada um com características próprias.

Enquanto os disjuntores geralmente utilizam um relé e um transformador de corrente para detectar corrente e fornecer o sinal de operação, o fusível fornece sua própria função de detecção e interrupção.

Portanto, fusíveis possuem características próprias de tensão X corrente que devem ser coordenadas com outros dispositivos de proteção.

Os fusíveis podem ser feitos com elementos metálicos simples, os quais derretem-se devido às perdas i^2R no material, ou por outros métodos, que podem ser molas sob tensão.

DISJUNTORES.

São dispositivos mecânicos capazes de conduzir e interromper correntes sob condições normais, e também capazes de conduzir e interromper correntes anormais (tais como curtos-circuitos) por um tempo especificado.

4.4.1 Chaves de Manobras e de Proteção

As chaves utilizadas nos circuitos de distribuição de acordo com sua função, podem ser classificadas em dois grandes grupos:

- *Chaves de Proteção:*

São as chaves utilizadas com a finalidade básica de proteção dos circuitos de distribuição ou de equipamentos neles instalados, desligando automaticamente os circuitos ou equipamentos que estejam sob condições de defeito. Esse grupo compreende todos os tipos de corta circuitos fusíveis. Além de sua finalidade básica, essas chaves podem, eventualmente, ser utilizadas também como chaves de manobras.

- *Chaves de Manobras:*

São as chaves utilizadas com finalidade básica de seccionamento dos circuitos, no máximo em condições normais, para fins de manobras como transferência de cargas, isolação de circuitos, etc.

Tais chaves não têm função de proteção, isto é, não interrompem automaticamente o circuito quando percorridas por uma corrente de defeito.

Tanto as chaves de proteção quanto as de manobra, podem ser para abertura em carga ou simplesmente, para abertura sem carga.

Para a proteção de circuitos primários de distribuição, devem ser adotadas as seguintes regras gerais:

a) As chaves de proteção somente deverão ser previstas ao longo de uma linha tronco ou alimentador, quando seu comprimento for muito longo e a proteção do cubículo da S/E for insuficiente para protegê-lo em razão dos baixos níveis de curto-circuito.

Provisoriamente, nesses circuitos deverão ser previstas apenas chaves de manobras.

b) Todo ramal de uma linha tronco ou de um alimentador deverá se derivar através de uma chave de proteção.

A não obediência aos critérios acima, com a utilização de elos fusíveis no alimentador, poderá tornar impraticável a perfeita coordenação devido a necessidade de utilização dos elos com correntes nominais elevadas. Deve-se então, tomar bastante cuidado a fim de manter a coordenação e uma seletividade satisfatória para o sistema, desde que não sejam prejudicadas as condições de manobras.

As diferentes características dos dispositivos protetores e a necessidade destes se coordenarem entre si e levando em conta ainda as anormalidades a que estão sujeitos os sistemas elétricos, torna a tarefa de coordenação para o engenheiro bastante complexa onde atualmente já existem especialistas no assunto.

4.5 Coordenação e seletividade

A medida que vai ocorrendo expansão dos sistemas elétricos, com circuitos mais extensos, maiores densidades de cargas, níveis de curtos mais elevados e consumidores cada vez mais exigentes, torna-se necessário o uso de técnicas aprimoradas com a finalidade de proteção dos circuitos primários de distribuição.

Até algum tempo atrás, os principais circuitos alimentadores de rede tinham como dispositivos de proteção apenas a ação de disjuntores colocados nas saídas das subestações. Esses disjuntores eram ajustados para abrir circuitos quando da ocorrência de faltas em quaisquer pontos do sistema, representando uma solução por demais simples, não levando em consideração o fator de confiabilidade no fornecimento de energia.

Atualmente, o fator de confiabilidade assume grande importância e por isso não pode ser desprezado. Daí a justificada preocupação do engenheiro de distribuição no sentido de que realmente se tenha alto índice na continuidade dos serviços. Para isso, o sistema de proteção deverá se constituir de diversos dispositivos cuidadosamente escolhidos e ajustados de tal modo a se obter fatores como segurança, confiabilidade, minimização dos efeitos de curto-circuito e economia.

No estudo de um sistema de proteção, pode-se considerar como princípios básicos a rápida eliminação dos efeitos decorrentes de faltas não permanentes ou "temporárias", a redução dos efeitos causados por faltas permanentes à menor área possível e de tal modo que os serviços possam ser restaurados no menor intervalo de tempo.

Para que o sistema de proteção atue de maneira a se constituir em uma proteção tecnicamente eficaz chega-se a necessidade de se efetuar uma cuidadosa coordenação entre os diversos dispositivos de proteção: elos fusíveis, religadores, seccionalizadores e disjuntores.

O sistema para ser realmente coordenado, deve satisfazer aos princípios básicos em que faltas temporárias são eliminadas o mais rapidamente possível ou pela ação de religadores, ou seccionalizadores, ou relés (com religamento) e as faltas permanentes são eliminadas pela ação dos fusíveis, ou seccionalizadores, mais próximos ao local da falta.

Os religadores, por exemplo, deverão cortar o circuito o mais rapidamente tão logo ocorra uma falta; deverão religar automaticamente e, após um certo intervalo, tornar a abrir o circuito caso a falta persista. A coordenação deve ser tal que esse período de retardamento permita que a corrente de curto provoque a queima de um fusível situado entre o religador e o ponto de ocorrência

dessa falta, e se a falta está localizada em um trecho do circuito não protegido por fusível então o religador atuará para efetuar o corte permanente, caso a falta persista.

Para aplicação dos diversos dispositivos de proteção, e coordenação entre si, torna-se necessário conhecer as regras de coordenação e as características dos equipamentos.

Somente assim, o engenheiro de distribuição estará apto a proceder aos estudos de proteção com precisão e otimização dos custos X benefícios.

4.6 Resultados da simulação do Curto-circuito

A segunda opção do menu principal, identificada na figura 4.1 mostrada abaixo, realiza a simulação do curto-circuito.

Para esta opção, PEGASUS sempre apresenta duas telas básicas, mostradas na figura 4.2. A primeira delas corresponde a uma descrição geral do módulo enfatizando os aspectos operacionais (Fig. 4.2(a)); a outra, exibe o diagrama unifilar do sistema com informações de como prosseguir na interação exibida na parte inferior (Fig. 4.2(b)).

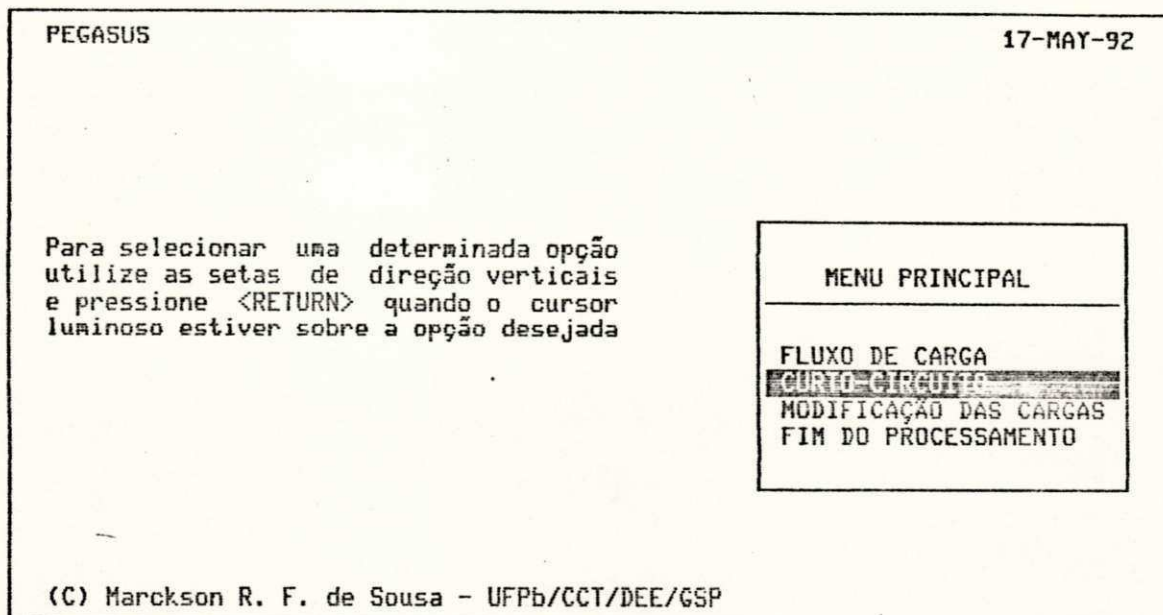


Figura 4.1 - Seleção da opção de Curto-circuito

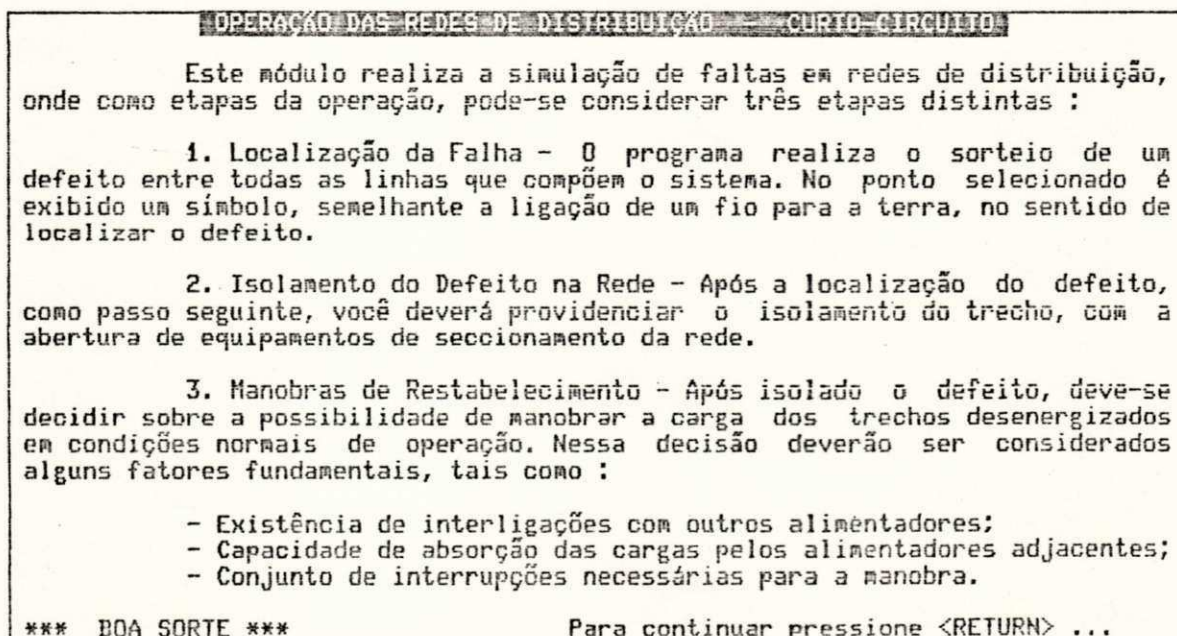


Figura 4.2(a) - Descrição do módulo de Curto-circuito

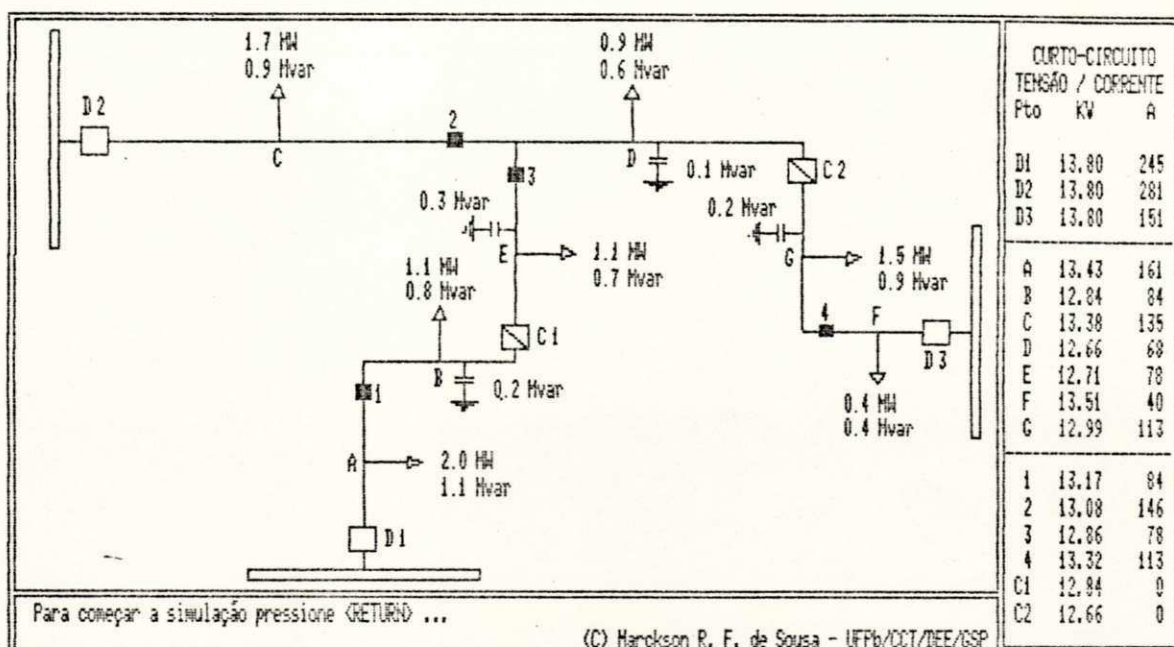


Figura 4.2(b) - Diagrama unifilar do sistema

A cada nova simulação do curto-circuito, novas cargas e um novo ponto de falta são gerados aleatoriamente.

Para cada nova situação estabelecida, há a resolução do circuito elétrico e os resultados obtidos são exibidos diretamente no monitor.

No começo da simulação, um ponto de falta é escolhido aleatoriamente e a coordenação da proteção começa a atuar com a abertura das chaves onde a corrente ultrapasse o valor suportado pelo equipamento.

Os trechos que por ventura tenham ficado desenergizados têm o seu traçado modificado de uma linha contínua para uma linha pontilhada, e as chaves que atuaram perdem o seu preenchimento interior indicando um estado de abertura, conforme fig. 4.3.

Como prosseguimento na interação, é solicitado em qual equipamento deve ser realizada uma operação de manobra, como também se esta deve ser de abertura ou fechamento.

A irrelevância desta última pergunta é bastante óbvia, uma vez que para um equipamento que se encontre em um estado de abertura, a única operação sensata é a de fechá-lo. Entretanto, esta pergunta serve para enfatizar a realização de operações desnecessárias. No estágio atual, estas implicações não são contabilizadas, apenas mensagens de advertência são mostradas, conforme fig. 4.4. Todavia, se qualquer tipo de avaliação estivesse sendo empregada, todas as operações desnecessárias poderiam causar uma redução no conceito atribuído.

Se um equipamento não for encontrado dentre aqueles mostrados no diagrama, uma mensagem de advertência também é exibida (Fig. 4.5).

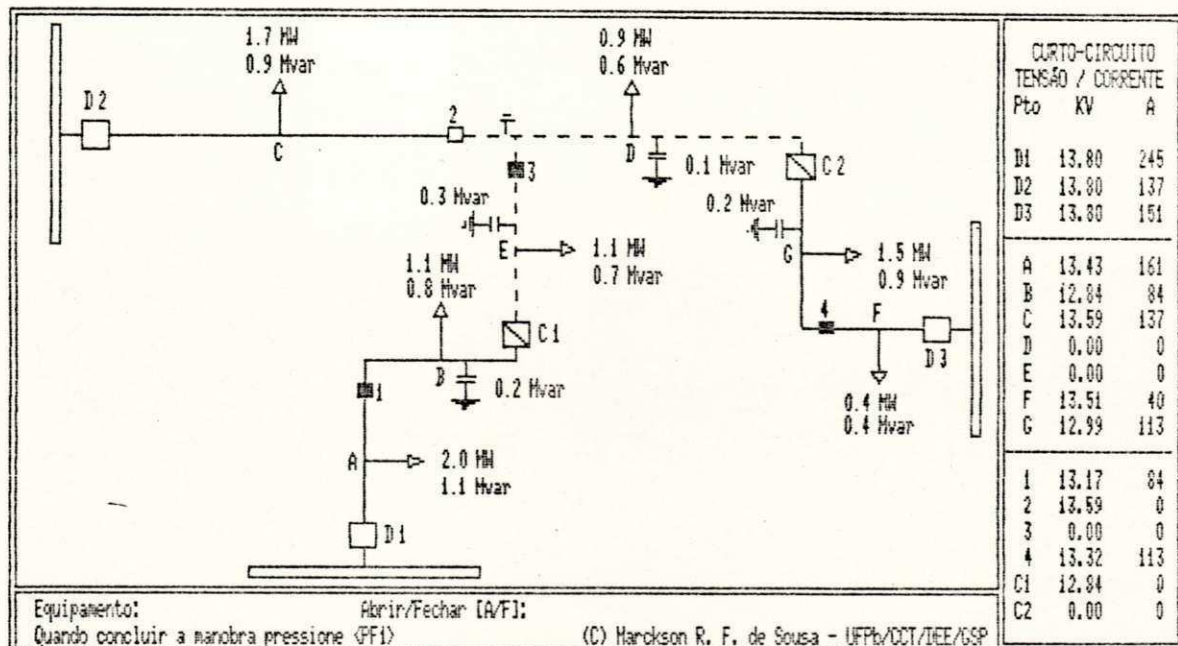


Figura 4.3 - Atuação do sistema de proteção

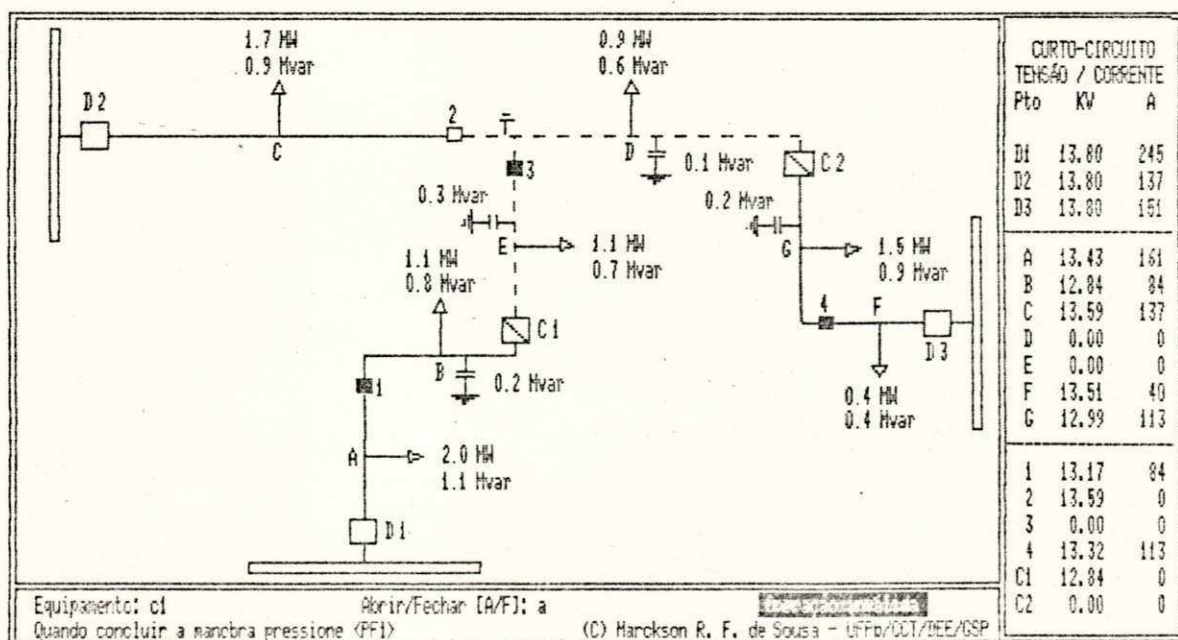


Figura 4.4 - Operação inválida em algum equipamento

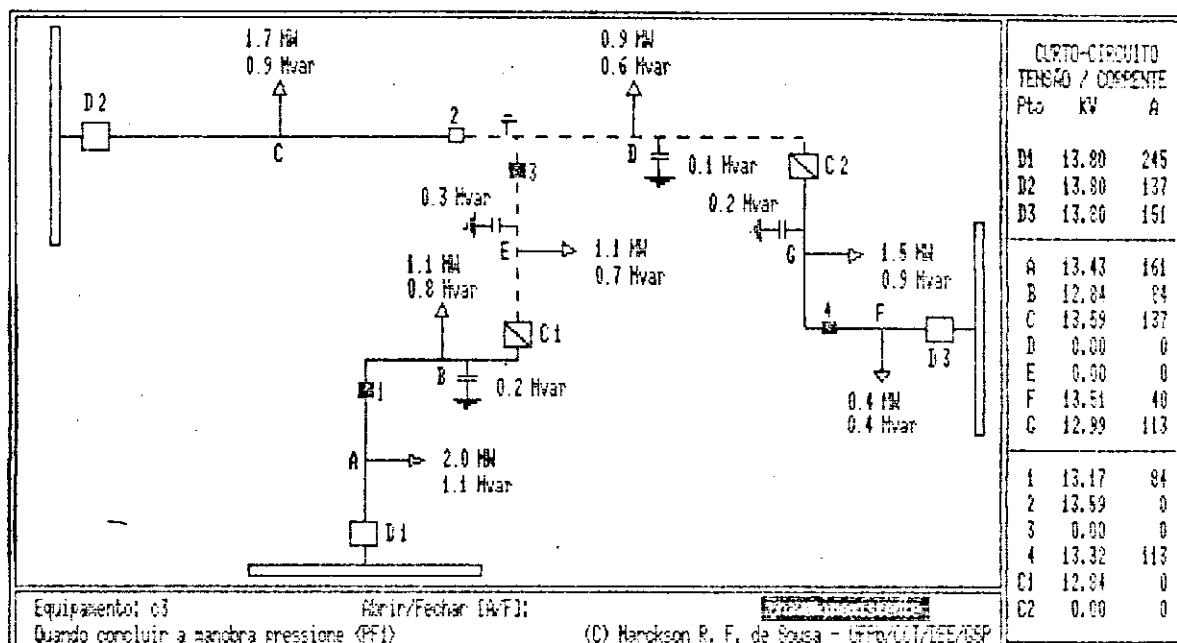


Figura 4.5(a) - Manobra em chave inexistente.

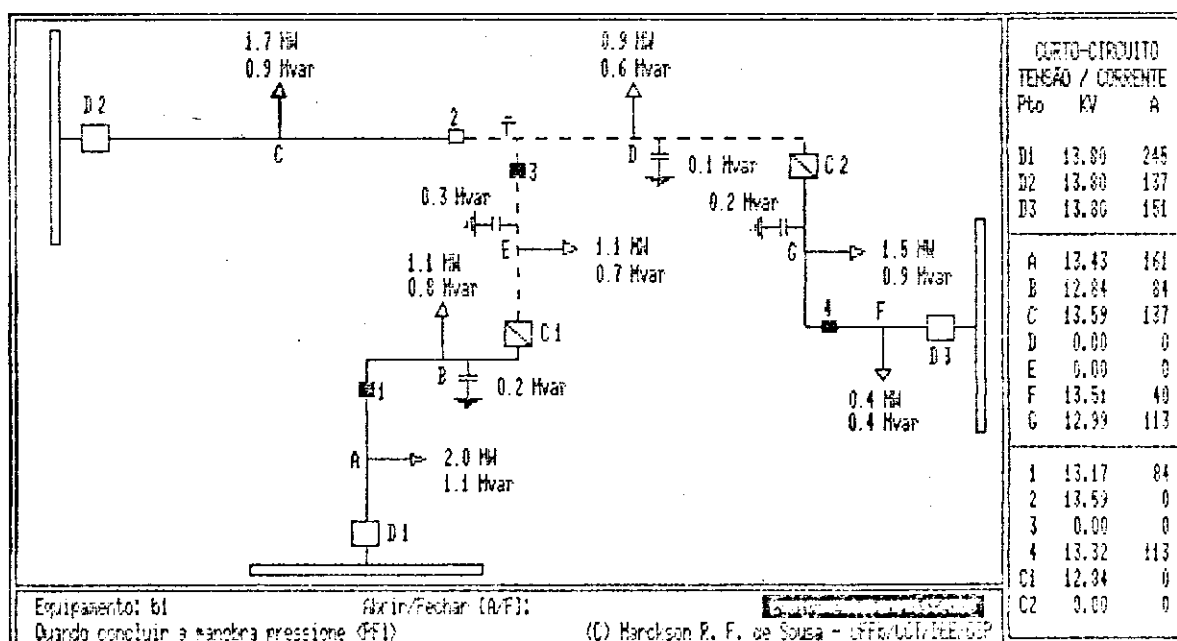


Figura 4.5(b) - Manobra em equipamento inexistente.

Após efetuada uma operação de manobra em uma chave, uma modificação do seu aspecto é percebida indicando uma operação de abertura ou fechamento, conforme seja a situação estabelecida. Por exemplo se na chave de número 3 for solicitada uma operação de abertura, o diagrama unifilar do sistema ficará com o seguinte aspecto:

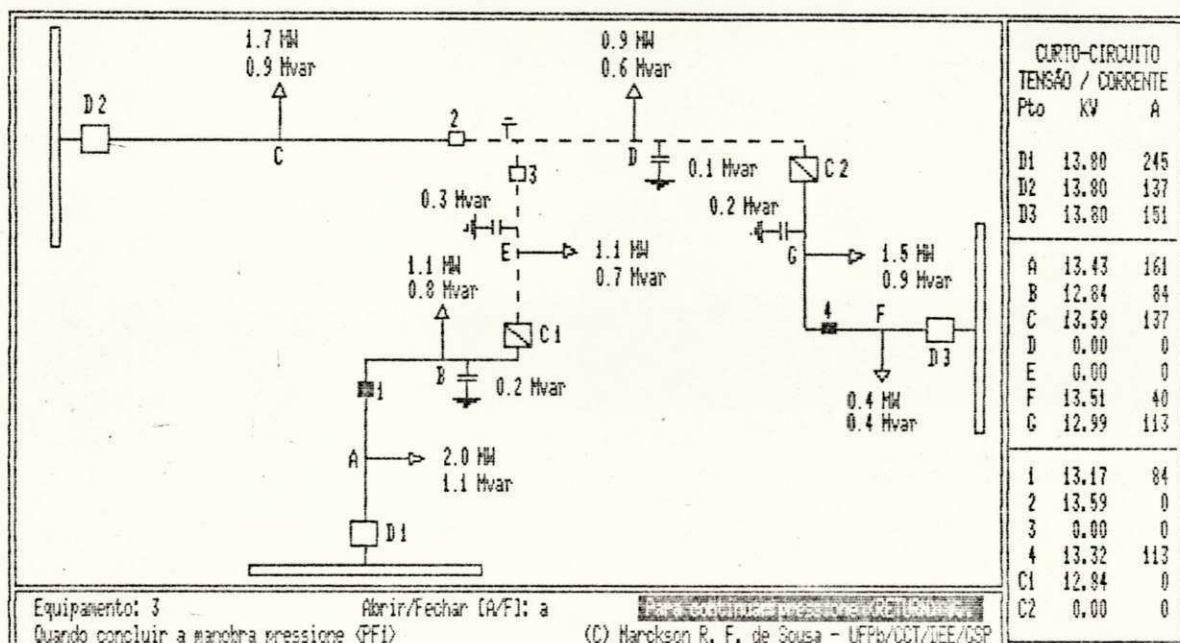


Figura 4.6 - Abertura da chave número 3

Antes da operação ser concretizada, podem ser observados os valores de corrente que circulam no circuito antes da atuação da coordenação da proteção. Para este caso, nenhuma alteração considerável no valor da corrente em qualquer ramo é percebida, pois a chave estava desenergizada (Fig. 4.6).

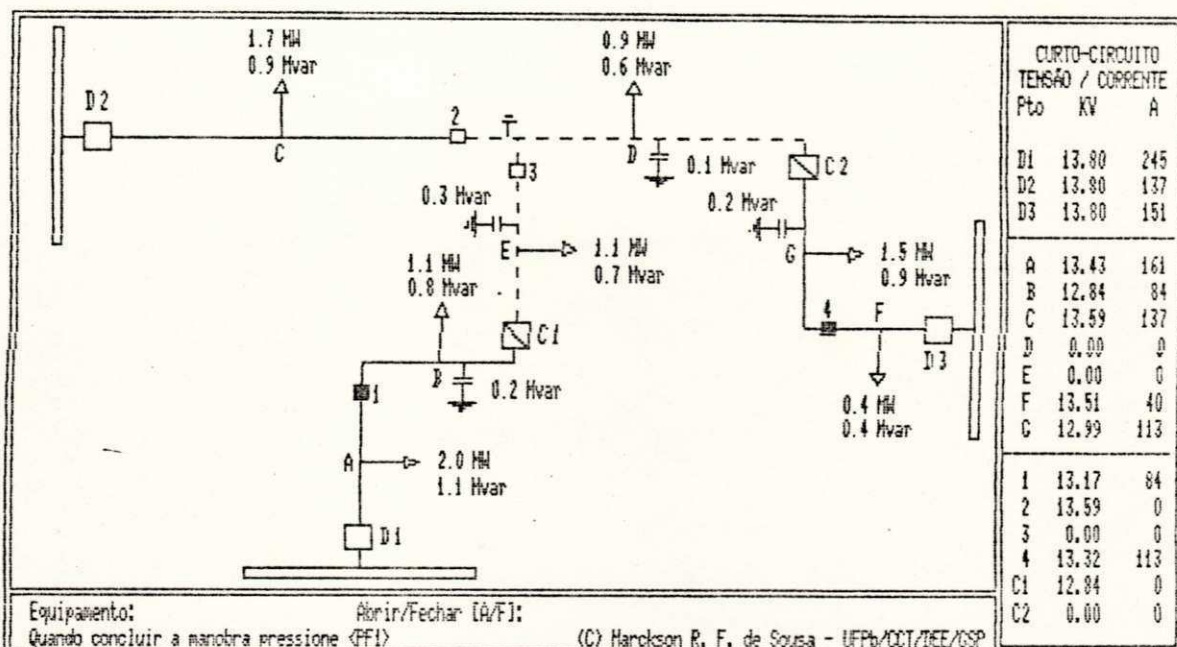


Figura 4.7 - Resultado da abertura da chave 3

Como prosseguimento na interação, considere o fechamento da chave C1 numa tentativa de recuperação da carga E antes desenergizada. Ao efetuar-se esta operação, uma corrente de um valor superior ao suportado pela chave 1 circula no referido ramo. Então, nesta tentativa de recuperar a carga E, o único resultado conseguido foi a perda da carga B, donde conclui-se que esta foi uma operação negligente (Fig 4.8).

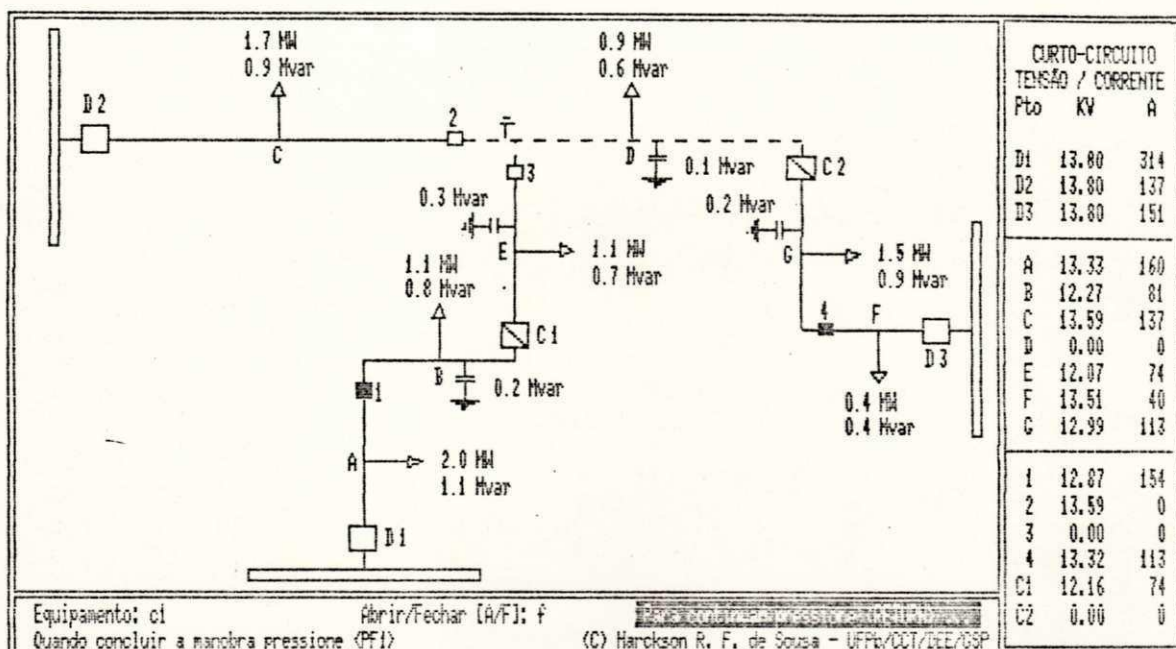


Figura 4.8 - Manobra para fechar a chave C1

Se uma outra tentativa impensada for realizada, mais consumidores serão desenergizados com maiores prejuízos para a concessionária. Se por acaso, se tentasse agora fechar a chave C2, novamente altas intensidades de corrente circulariam nos ramos ocasionando não uma recuperação de qualquer carga, mas a perda de novas cargas (Fig 4.9).

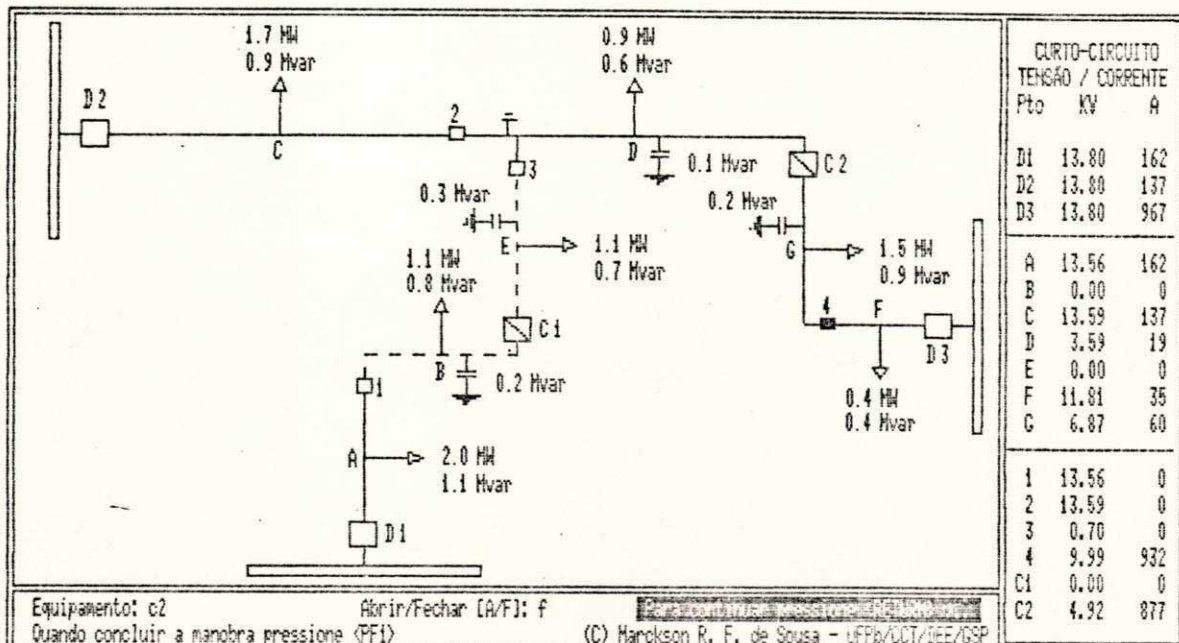


Figura 4.9 - Manobra para fechar a chave C2

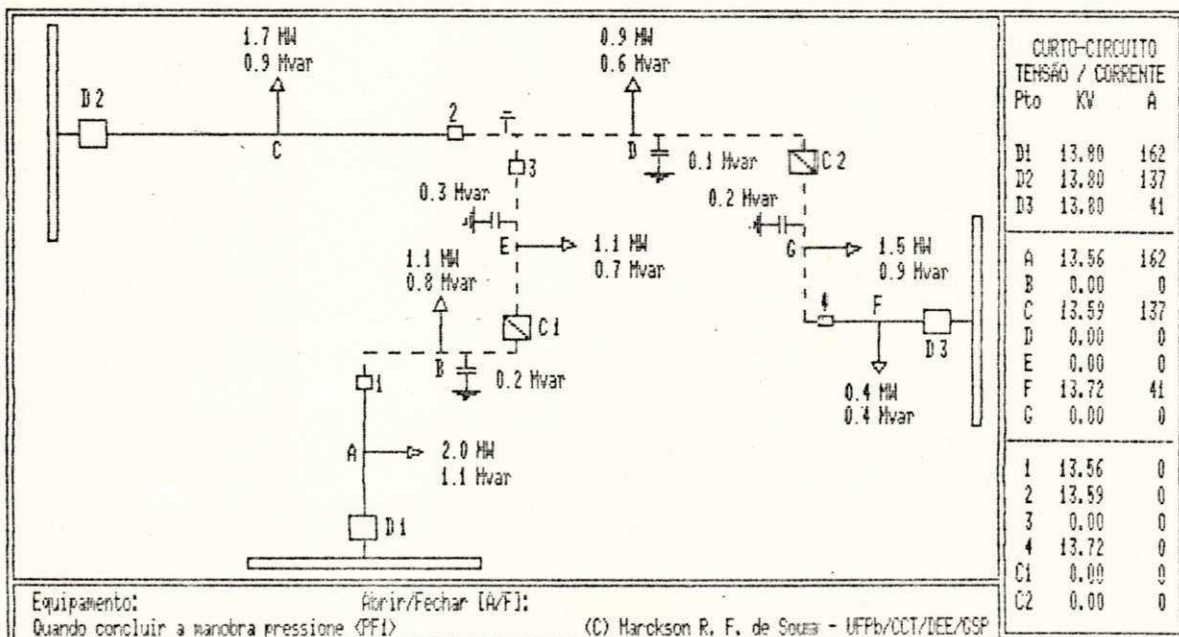


Figura 4.10 - Resultado do fechamento de C2

4.7 Importância da disposição dos equipamentos no circuito

Para cada situação de falta, a instalação dos equipamentos nos alimentadores é um fator fundamental para que seja possível uma melhor coordenação do sistema de proteção. Como um exemplo, considere o acréscimo de uma nova chave ao sistema (Chave na posição 3 - Fig. 4.11).

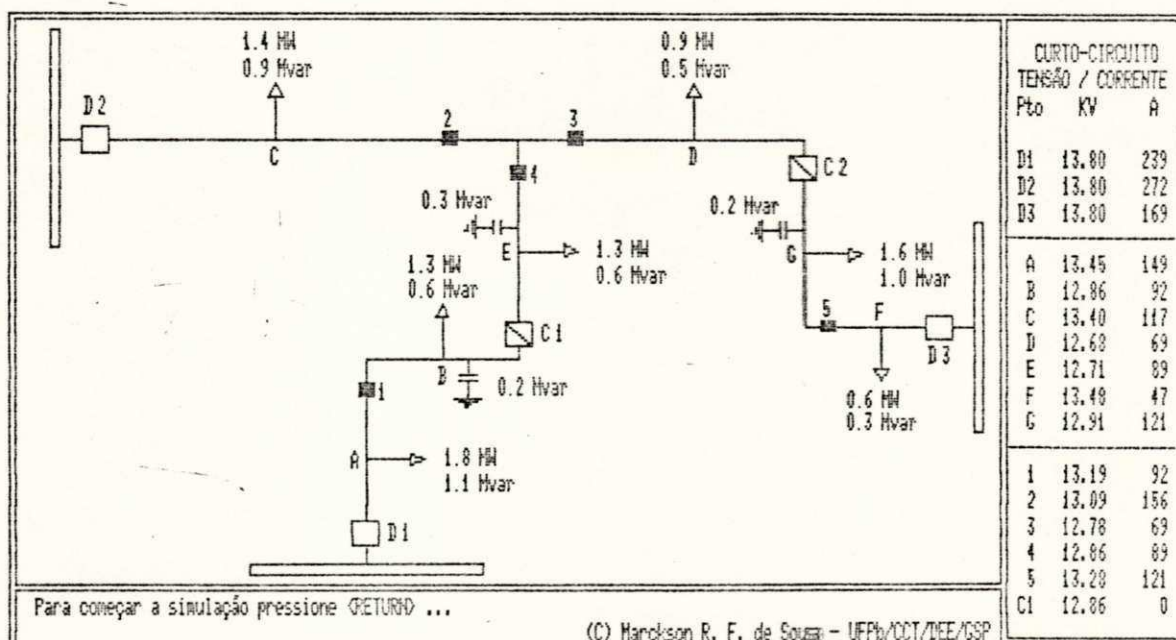


Figura 4.11 - Sistema como o acréscimo de uma chave

Se por um acaso uma falta no mesmo ponto que aquela examinada anteriormente ocorrer, uma menor porção da carga ficará desenergizada se as operações de manobra forem corretamente realizadas, conforme mostrado abaixo:

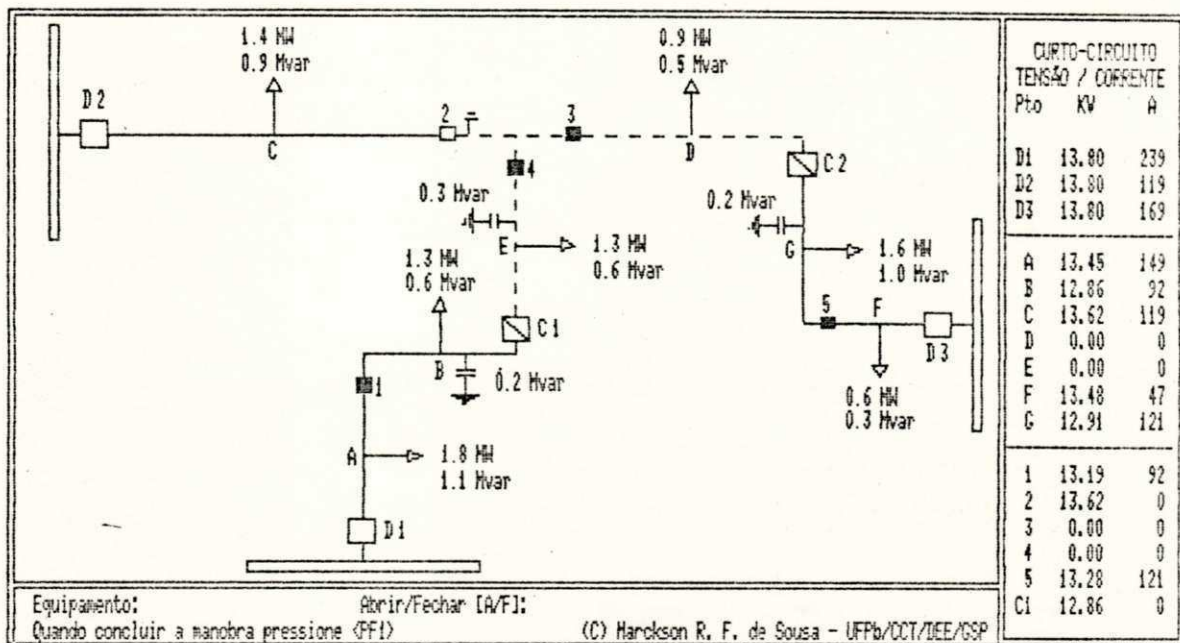


Figura 4.12 - Ocorrência de uma falta no sistema

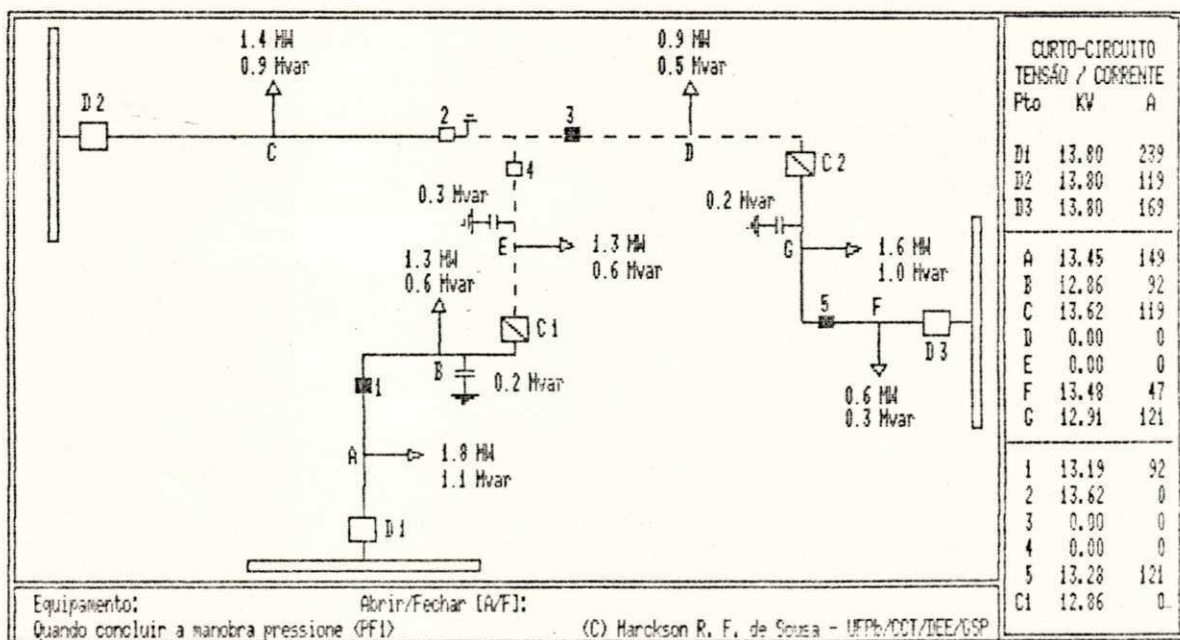


Figura 4.13 - Abertura da chave número 4

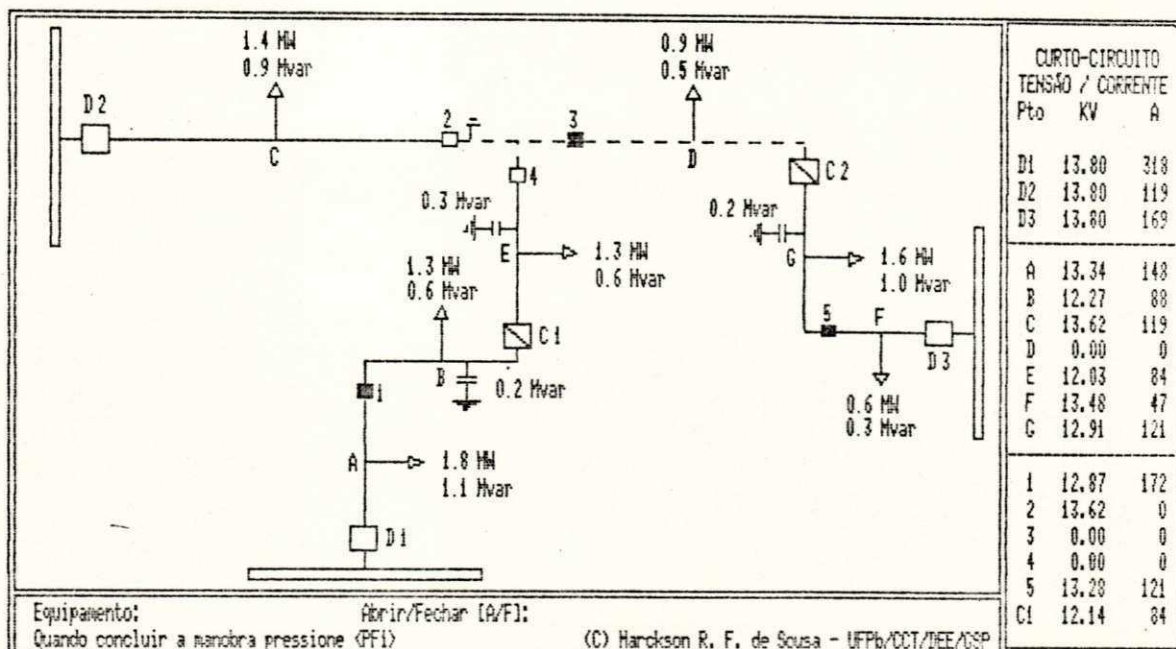


Figura 4.14 - Fechamento da chave C1

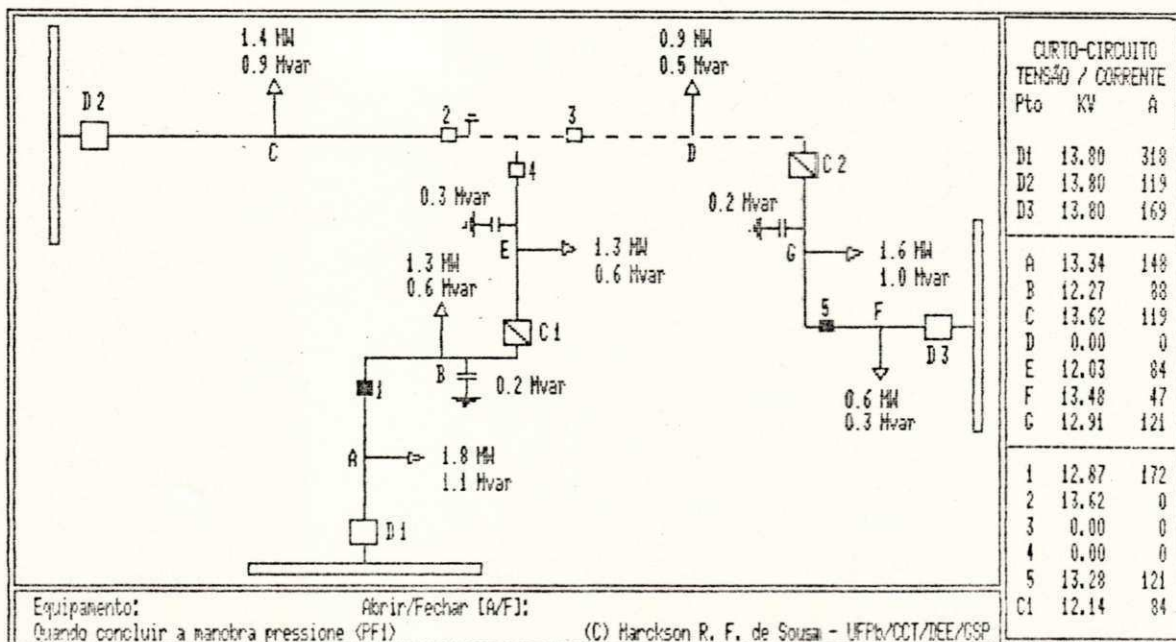


Figura 4.15 - Abertura da chave número 3

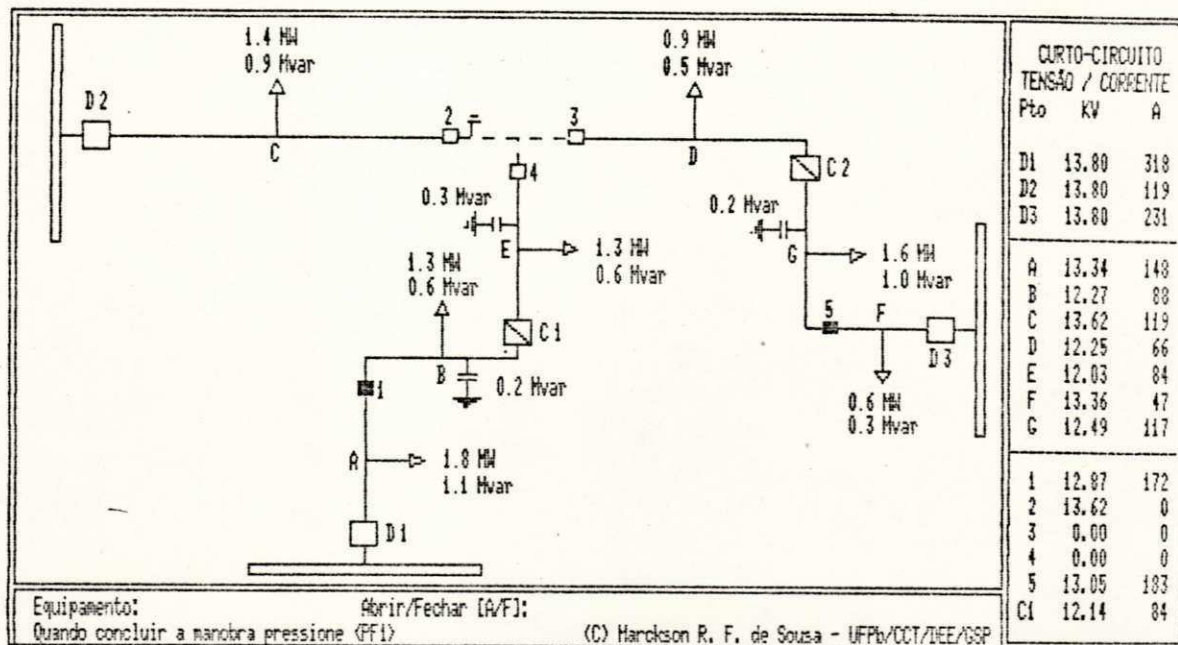


Figura 4.16 - Fechamento da chave C2.

5 MODIFICAÇÃO DAS CARGAS

5.1 Introdução

Neste capítulo, descreve-se o terceiro módulo do simulador, identificado na figura 5.1 mostrada abaixo e, que realiza a modificação do valor das cargas do sistema sem a necessidade de utilização de um editor de textos.

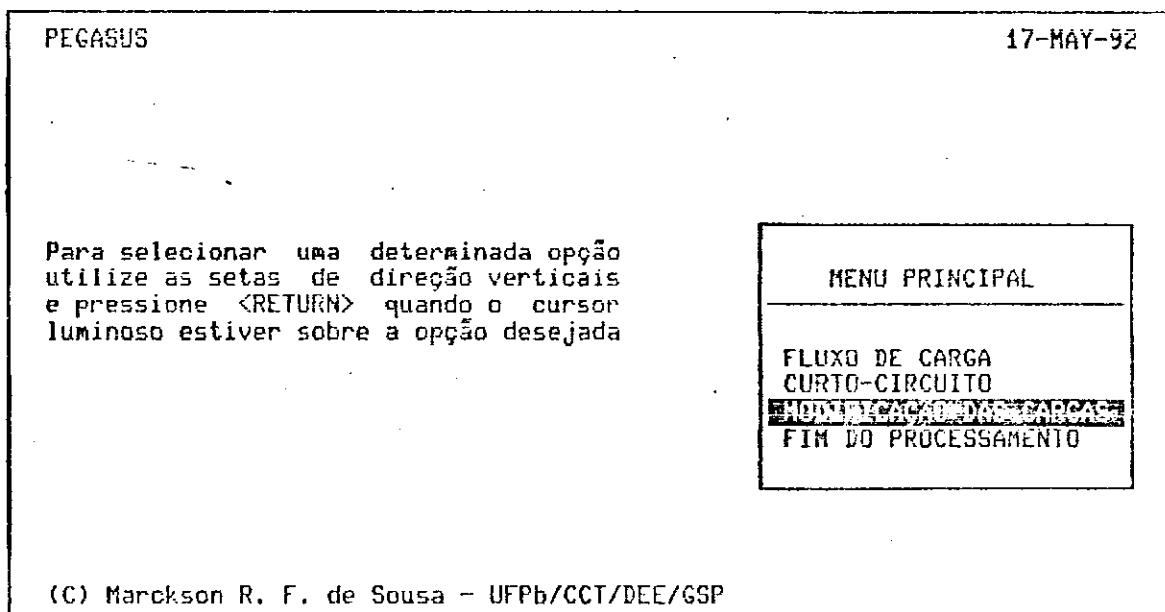


Figura 5.1 - Seleção da opção de Modificação das cargas

5.2 Utilização deste módulo

Após a realização de um número considerável de simulações, mesmo com a utilização de uma regularidade estatística, é desejado muitas vezes uma modificação dos dados de entrada. Para a modificação da topologia do sistema, como são necessários alguns conhecimentos de computação gráfica, e como nem todos os usuários finais possuem as noções básicas necessárias, é permitido apenas a alteração direta do valor médio e do desvio padrão das cargas encontradas no sistema.

Para este módulo apenas uma tela é exibida, onde são mostrados o diagrama unifilar do sistema e todos os pontos de carga passivos de modificação.

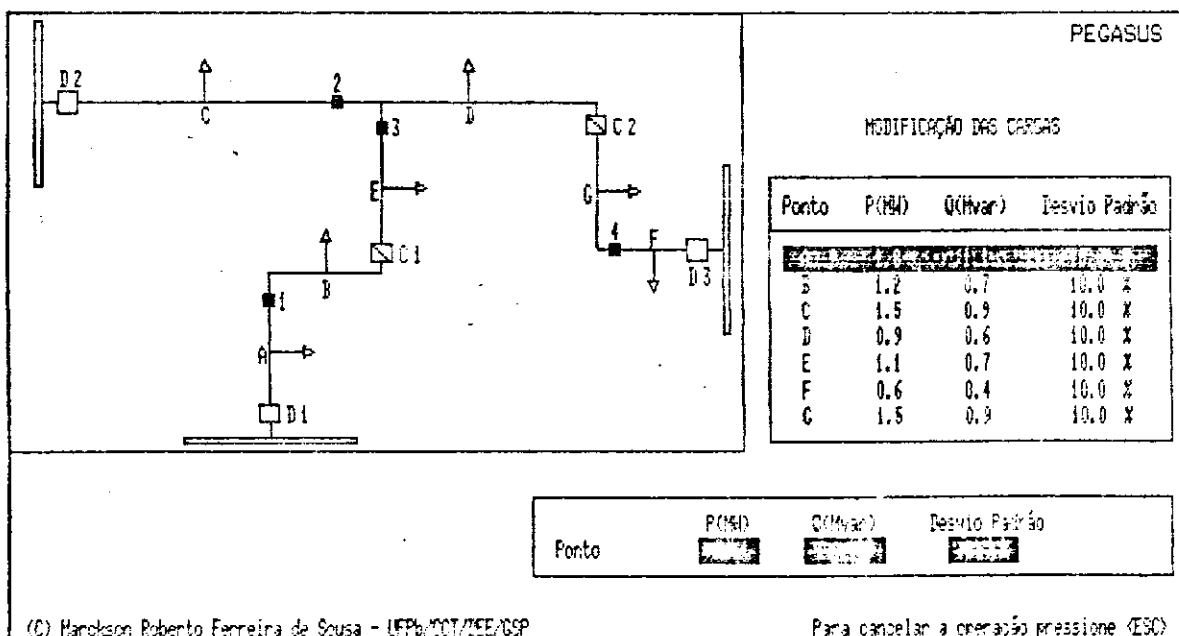


Figura 5.2 - Tela para Modificação das Cargas

Para a modificação de qualquer uma das cargas é necessário a princípio selecionar o ponto de carga desejado, utilizando-se para isso o menu de opções que contém todos os pontos de carga.

Para o ponto selecionado é permitido a modificação dos valores para a potência ativa, potência reativa e desvio padrão.

A qualquer instante é permitido cancelar a operação, persistindo então os valores originais da carga selecionada.

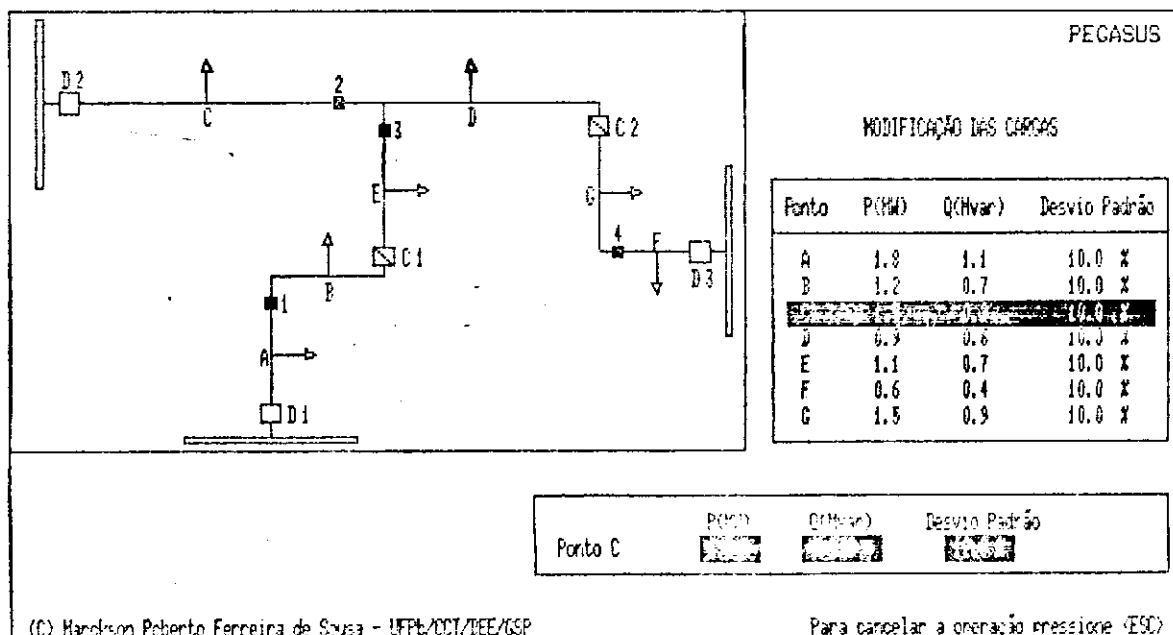


Figura 5.3 - Seleção de um ponto de carga.

6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Uma condição essencial para o desenvolvimento de aplicativos na área de Sistemas Elétricos de Potência é a incorporação da visualização e controle das entradas e saídas de forma gráfica utilizando-se o computador digital. Isto é particularmente importante para a análise ou simulação das redes devido ao grande tamanho dos sistemas. A visualização gráfica facilita a entrada dos dados e a percepção e interpretação dos resultados da simulação.

Com o desenvolvimento da simulação em linguagem FORTRAN, algumas dificuldades inerentes a linguagem puderam ser sentidas, tais como a não utilização direta dos recursos dos modos de vídeo (reverso, piscante, etc.); o não posicionamento do cursor na tela; a entrada de dados através do teclado bastante ineficiente por possuir tamanho fixo e requerer um toque de finalização, etc.

Para contornar estas dificuldades, foi necessário a utilização da linguagem VAX MACRO, utilizando-se diretamente rotinas encontradas na biblioteca "SMG" (Screen Management Guidelines - Run-Time Library Routines).

Se uma outra linguagem de alto nível com recursos mais poderosos para gerenciamento de tela estivesse disponível, provavelmente muitas dificuldades teriam sido evitadas.

Com o advento de novos compiladores, as dificuldades encontradas devem desaparecer, tornando-se cada vez mais simples a obtenção de simulações escritas totalmente em FORTRAN com capacidade de telas gráficas, escolha de opções através de menus, programas e controle de dados. Sobretudo, se forem utilizados microcomputadores, devido ao grande avanço alcançado na área de Software destinado aos mesmos.

O simulador desenvolvido apresenta como uma das principais vantagens a flexibilidade disponível, pois pode-se modificar desde o valor das cargas até a topologia do sistema. Em uma etapa futura, poderá ser desenvolvido um editor gráfico no intuito de facilitar ainda mais a entrada dos dados. Por exemplo, uma certa combinação de barras e linhas poderá ser relocável, onde subseqüentes alterações de posição poderão ser conseguidas com simples toques nas teclas direcionais do teclado.

A saída gráfica vem introduzir uma melhor visualização dos resultados que outrora/atualmente estão dispostos sob a forma de enormes tabelas. A utilização de cores para diferenciar situações distintas vem tornar o simulador um excelente recurso didático. Por exemplo, se uma sobrecarga ocorrer no sistema, as linhas envolvidas

poderiam ter sua cor modificada para uma tonalidade de vermelho, o que intuitivamente já indica perigo.

A interface aqui utilizada torna o simulador auto-instrutivo e de fácil utilização não requerendo do usuário grande conhecimento da área de informática.

Com a aplicação de uma metodologia adequada, o simulador pode propor um conceito lógico visando a informatização do processo destinado à Coordenação da Proteção nas Empresas de Distribuição de Energia Elétrica.

A N E X O I

MÉTODO DA BIFATORAÇÃO

MÉTODO DA BIFATORAÇÃO

Neste anexo é mostrada uma técnica para a resolução de um sistema de equações lineares

$$AX = b$$

onde: A = matriz de ordem $n \times n$

X = vetor coluna que representa a solução

b = vetor coluna que possui os termos independentes

Para obter-se a solução do sistema, a tarefa mais importante é a obtenção da inversa da matriz A , uma vez que

$$A^{-1}AX = A^{-1}b$$

$$X = A^{-1}b$$

Os métodos de fatoração de matrizes, o produto forma a inversa e a fatoração triangular, são ambos muito vantajosos e fonte consagrada para solução de grande parte de equações lineares, particularmente quando se é necessário resolver as mesmas equações básicas mas com diferentes vetores independentes. Embora ambas as técnicas envolvam fatoração, cada método expressa estes fatores de maneira consideravelmente diferente; [Zollenkopf 1971] ao

combinar estas duas técnicas deu origem ao método da Bi-Fatoração.

Este método é particularmente adequado para matrizes com coeficientes esparsos que não possuam elementos nulos na diagonal e que sejam simétricas ou assimétricas, mas que possuam uma estrutura esparsa simétrica. Embora existam muitos problemas que não se encaixem nestas condições, existem inversamente muitos outros apropriados. Exemplos típicos são os sistemas elétricos.

O método da Bi-Fatoração é uma técnica importante e frequentemente utilizada para a resolução de uma grande margem de problemas de engenharia.

Este método é baseado na descoberta dos $2n$ fatores de matrizes para um problema de n -ésima ordem, o produto destes fatores deve satisfazer a seguinte condição:

$$L^{(n)} L^{(n-1)} \dots L^{(2)} L^{(1)} A R^{(1)} R^{(2)} \dots R^{(n-1)} R^{(n)} = U \quad (A1.1)$$

onde: A = matriz original

L = matriz diagonal inferior

R = matriz diagonal superior

U = matriz identidade de ordem n

Pré-multiplicando a equação (A1.1) pelas inversas $L^{(n)}$, $L^{(n-1)}$, ..., $L^{(2)}$ e $L^{(1)}$ consecutivamente, obtém-se:

$$A R^{(1)} R^{(2)} \dots R^{(n-1)} R^{(n)} = (L^{(1)})^{-1} (L^{(2)})^{-1} \dots (L^{(n-1)})^{-1} (L^{(n)})^{-1} \quad (A1.2)$$

Pós-multiplicando a equação (A1.2) por $L^{(n)}$, $L^{(n-1)}$, ..., $L^{(2)}$ e $L^{(1)}$ consecutivamente, obtém-se:

$$R^{(1)} R^{(2)} \dots R^{(n-1)} R^{(n)} L^{(n)} L^{(n-1)} \dots L^{(2)} L^{(1)} = U \quad (A1.3)$$

Finalmente, pré-multiplicando a equação (A1.3) por A^{-1} , obtém-se:

$$R^{(1)} R^{(2)} \dots R^{(n-1)} R^{(n)} L^{(n)} L^{(n-1)} \dots L^{(2)} L^{(1)} = A^{-1} \quad (A1.4)$$

Os fatores de matrizes obtidos à partir do critério estabelecido pela equação (A1.1), possibilitam obter a inversa da matriz A de modo a ser expressa e determinada implicitamente em termos destes fatores.

Para determinar os fatores L e R , as seguintes matrizes intermediárias são introduzidas:

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

O sucessivo produto interno triplo $L^{(k)} A^{(k-1)} R^{(k)}$ transforma os coeficientes iniciais da matriz $A = A^{(0)}$ para a matriz identidade U .

A produção dos fatores de matrizes $L^{(k)}$ e $R^{(k)}$ e a redução dos coeficientes da matriz A é ilustrado considerando-se um problema de quarta ordem que possui a seguinte matriz inicial:

$$A = A^{(0)} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(0)} & a_{12}^{(0)} & a_{13}^{(0)} & a_{14}^{(0)} \\ a_{21}^{(0)} & a_{22}^{(0)} & a_{23}^{(0)} & a_{24}^{(0)} \\ a_{31}^{(0)} & a_{32}^{(0)} & a_{33}^{(0)} & a_{34}^{(0)} \\ a_{41}^{(0)} & a_{42}^{(0)} & a_{43}^{(0)} & a_{44}^{(0)} \end{bmatrix}$$

Com o primeiro passo de redução, $L^{(1)}A^{(0)}R^{(1)} = A^{(1)}$, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} L_{11}^{(1)} & & & \\ L_{21}^{(1)} & 1 & & \\ L_{31}^{(1)} & & 1 & \\ L_{41}^{(1)} & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^{(0)} & a_{12}^{(0)} & a_{13}^{(0)} & a_{14}^{(0)} \\ a_{21}^{(0)} & a_{22}^{(0)} & a_{23}^{(0)} & a_{24}^{(0)} \\ a_{31}^{(0)} & a_{32}^{(0)} & a_{33}^{(0)} & a_{34}^{(0)} \\ a_{41}^{(0)} & a_{42}^{(0)} & a_{43}^{(0)} & a_{44}^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_{12}^{(1)} & R_{13}^{(1)} & R_{14}^{(1)} \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & a_{24}^{(1)} \\ 0 & a_{32}^{(1)} & a_{33}^{(1)} & a_{34}^{(1)} \\ 0 & a_{42}^{(1)} & a_{43}^{(1)} & a_{44}^{(1)} \end{bmatrix}$$

$$\text{onde: } L_{11}^{(1)} = \frac{1}{a_{11}^{(0)}}$$

$$L_{i1}^{(1)} = -\frac{a_{i1}^{(0)}}{a_{11}^{(0)}} \quad R_{1i}^{(1)} = -\frac{a_{1i}^{(0)}}{a_{11}^{(0)}} \quad (i=2,3,4)$$

$$a_{ij}^{(1)} = a_{ij}^{(0)} - \frac{a_{i1}^{(0)} a_{1j}^{(0)}}{a_{11}^{(0)}} \quad (i=2,3,4 ; j=2,3,4)$$

O segundo passo de redução, $L^{(2)}A^{(1)}R^{(2)} = A^{(2)}$, fornece:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots \\ \cdot & L_{22}^{(2)} & \dots \\ \cdot & L_{32}^{(2)} & 1 & \dots \\ \cdot & L_{42}^{(2)} & \cdot & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & a_{24}^{(1)} \\ \cdot & a_{32}^{(1)} & a_{33}^{(1)} & a_{34}^{(1)} \\ \cdot & a_{42}^{(1)} & a_{43}^{(1)} & a_{44}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & R_{23}^{(2)} & R_{33}^{(2)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & a_{33}^{(2)} & a_{34}^{(2)} \\ \cdot & \cdot & a_{43}^{(2)} & a_{44}^{(2)} \end{bmatrix}$$

onde: $L_{22}^{(2)} = \frac{1}{a_{22}^{(1)}}$

$$L_{i2}^{(2)} = -\frac{a_{i2}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \quad R_{2i}^{(2)} = -\frac{a_{2i}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \quad (i=3,4)$$

$$a_{ij}^{(2)} = a_{ij}^{(1)} - \frac{a_{i2}^{(1)} a_{2j}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \quad (i=3,4 ; j=3,4)$$

O quarto e último passo de redução, $L^{(4)}A^{(3)}R^{(4)} = A^{(4)} = U$, fornece:

$$\begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \cdot & 1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & L_{44}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dots & \cdot \\ \cdot & 1 & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & a_{44}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dots & \cdot \\ \cdot & 1 & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \cdot \\ \cdot & 1 & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix}$$

onde: $L_{44}^{(4)} = \frac{1}{a_{44}^{(3)}}$

A partir deste problema de quarta ordem pode-se perceber que a matriz final R é a matriz identidade. Além disso, pode-se deduzir que, para um problema de n -ésima ordem, os fatores de matrizes L e R no k -ésimo passo de redução possuem o seguinte aspecto:

$$L^{(k)} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & \cdot & & & & \\ & & \cdot & & & \\ & & & \cdot & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & & 1 & \\ & & & L_{kk} & & & & \\ & & & L_{ik}^{(k)} & 1 & & & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & & L_{nk}^{(k)} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad R^{(k)} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & \cdot & & & & & & \\ & & \cdot & & & & & \\ & & & \cdot & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & 0 & \dots & 0 & 1 & R_{kj}^{(k)} & \dots & R_{kn}^{(k)} \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & \cdot & \\ & & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

onde: $L_{kk}^{(k)} = \frac{1}{a_{kk}^{(k-1)}}$

$$L_{ik}^{(k)} = -\frac{a_{ik}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}} \quad (i=k+1, \dots, n)$$

$$R_{kj}^{(k)} = -\frac{a_{kj}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}} \quad (j=k+1, \dots, n)$$

$$a_{ij} = a_{ij}^{(k-1)} - \frac{a_{ik}^{(k-1)} a_{kj}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}} \quad (i=k+1, \dots, n) \\ (j=k+1, \dots, n)$$

Para uma matriz simétrica:

$$a_{ik}^{(k-1)} = a_{ki}^{(k-1)}$$

Portanto, $R_{ik}^{(k)} = L_{ki}^{(k)} \quad (A1.5)$

No caso de matrizes com coeficientes simétricos, a equação (A1.5) indica que, exceto os elementos da diagonal, a k -ésima linha de $R^{(k)}$ é idêntica a k -ésima coluna de $L^{(k)}$. Da mesma forma, os elementos da diagonal de $R^{(k)}$ são todos iguais a unidade e, desde que são conhecidos implicitamente pode-se estimar os elementos de $L^{(k)}$. Então, o número necessário de operações e a quantidade de espaço necessário para armazenamento é reduzido quase a metade.

Para ilustrar a técnica da Bi-Fatoração, consideremos o seguinte exemplo numérico:

$$\begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & . \\ -1 & 2 & . & . \\ -1 & . & 2 & -1 \\ . & . & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

O primeiro passo de redução, $L^{(1)}A^{(0)}R^{(1)} = A^{(1)}$, fornece:

$$L_{11}^{(1)} = \frac{1}{a_{11}^{(0)}} = \frac{1}{3} \qquad L_{21}^{(1)} = -\frac{a_{21}^{(0)}}{a_{11}^{(0)}} = -\frac{-1}{3} = \frac{1}{3}$$

$$L_{31}^{(1)} = -\frac{a_{31}^{(0)}}{a_{11}^{(0)}} = -\frac{-1}{3} = \frac{1}{3} \qquad L_{41}^{(1)} = -\frac{a_{41}^{(0)}}{a_{11}^{(0)}} = -\frac{0}{3} = 0$$

$$R_{11}^{(1)} = 1 \qquad R_{12}^{(1)} = L_{21}^{(1)} \qquad R_{13}^{(1)} = L_{31}^{(1)} \qquad R_{14}^{(1)} = L_{41}^{(1)}$$

$$\begin{bmatrix} 1/3 & . & . & . \\ 1/3 & 1 & . & . \\ 1/3 & . & 1 & . \\ 0 & . & . & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & . \\ -1 & 2 & . & . \\ -1 & . & 2 & -1 \\ . & . & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 0 \\ . & 1 & . & . \\ . & . & 1 & . \\ . & . & . & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & 5/3 & -1/3 & . \\ . & -1/3 & 5/3 & -1 \\ . & . & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

A nova matriz $A^{(1)}$ foi obtida através do produto matricial, mas poderia ter sido calculada através de:

$$a_{ij} = a_{ij}^{(k-1)} - \frac{a_{ik}^{(k-1)} a_{kj}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}} \quad \begin{array}{l} (i=k+1, \dots, n) \\ (j=k+1, \dots, n) \end{array}$$

O segundo passo de redução, $L^{(2)} A^{(1)} R^{(2)} = A^{(2)}$, fornece:

$$\begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & 3/5 & . & . \\ . & 1/5 & 1 & . \\ . & 0 & . & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & 5/3 & -1/3 & . \\ . & -1/3 & 5/3 & -1 \\ . & . & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & 1 & 1/5 & 0 \\ . & . & 1 & . \\ . & . & . & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & 1 & . & . \\ . & . & 8/5 & -1 \\ . & . & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

O terceiro passo de redução, $L^{(3)} A^{(2)} R^{(3)} = A^{(3)}$, fornece:

$$\begin{bmatrix} 1 & . & 0 & . \\ . & 1 & 0 & . \\ . & . & 5/8 & . \\ . & . & 5/8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & 1 & . & . \\ . & . & 8/5 & -1 \\ . & . & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & 1 & . & . \\ 0 & 0 & 1 & 5/8 \\ . & . & . & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & . & . & . \\ . & 1 & . & . \\ . & . & 1 & . \\ . & . & . & 3/8 \end{bmatrix}$$

O quarto e último passo de redução, $L^{(4)}A^{(3)}R^{(4)} = A^{(4)} = U$, fornece:

$$\begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \dots & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 8/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dots & \dots \\ \dots & 1 & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 3/8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dots & \dots \\ \dots & 1 & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \dots \\ \dots & 1 & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

A solução para as equações originais pode ser obtida à partir da equação (A1.4),

$$A^{-1} = R^{(1)}R^{(2)}R^{(3)}R^{(4)}L^{(4)}L^{(3)}L^{(2)}L^{(1)}$$

Mas como $R^{(4)}$ é a matriz identidade:

$$AX = B$$

$$X = A^{-1}b$$

$$X = R^{(1)}R^{(2)}R^{(3)}L^{(3)}L^{(2)}L^{(1)}b$$

Multiplicando-se estes fatores de matrizes, obtem-

se:

$$X = \begin{bmatrix} 7/3 \\ 5/3 \\ 13/3 \\ 16/3 \end{bmatrix}$$

Este exemplo numérico mostra que mesmo para este pequeno problema de quarta ordem, os fatores de matrizes são esparsos. Isto indica que para muitos problemas com um alto grau de esparsidade, esta técnica é bastante apropriada, os ganhos são muito significativos.

Para calcular X , o vetor b foi multiplicado sequencialmente por $2n$ fatores de matrizes. De qualquer modo, exceto para uma linha ou coluna, estes fatores são todos matrizes identidades e portanto cada multiplicação individual torna-se completamente trivial, com programação apropriada há apenas o envolvimento dos elementos não-nulos para cada fator de matriz.

Implementação das rotinas:

Baseando-se no artigo "Bi-Factorisation - Basic Computational Algorithm and Programming Techniques" de K. Zollenkopf, foram desenvolvidas rotinas em linguagem FORTRAN 77, para a simulação do processo de Bi-Fatoração.

O artigo fornece três fluxogramas que representam três etapas distintas do processo. Entretanto, ainda foi necessário o desenvolvimento de uma outra rotina para o estabelecimento da sequência de eliminação que torna mínima a memória de armazenamento requerida, e que precede os módulos fornecidos no processo de solução.

Para o presente caso, que trata de uma matriz simétrica, os elementos não nulos são armazenados em um conjunto denominado **CE**. Os índices das linhas dos elementos de **CE** são armazenados em uma tabela paralela denominada **ITAG**. Simultaneamente, uma tabela **LNXT** contém a localização de cada elemento não nulo de **CE** em ordem crescente. Um elemento 0 em **LNXT** indica o último termo da coluna.

As posições iniciais das colunas individuais de **CE** são armazenadas na tabela **LCOL**. A tabela **NOZE** contém o número de elementos não nulos em cada coluna. O processo de ordenação ótima requer uma tabela adicional **NSEQ**. Esta tabela inicialmente contém valores inteiros de 1 até n em ordem crescente.

Abaixo é mostrada a rotina desenvolvida, como também os fluxogramas mencionados anteriormente.

```

-----
SUBROUTINE TcBFac(I1,K1,Nk,Nl,Lfmax,Zcte,Yl,V)
-----
TCBFAC
C
C   Input Arguments  : Nk      Number of unknowns
C                   : Nl      Number of branches
C                   : Lfmax  >= Nk + 2*Nl, scalar used for dimensioning
C                   : I1     Sending end node numbers
C                   : K1     Receiving end node numbers
C                   : Zcte   Branch coefficients (Loads)
C                   : Yl     Branch coefficients (Admittance of
C                           transmission lines)
C
C   Output Arguments : V      Vector of unknowns, solution vector
C
C   Error Conditions : If the dimensions of vectors ITAG, LNXT and CE
C                   are too small, the modules TCB_F1, TCB_F2 or
C                   TCB_F3 will exit the program and displays the
C                   error message.
C
C   Module Overview  : The subroutine formulate the elements of a matrix
C                   A from a given nodal network and branch data and
C                   solve directly the matrix equation
C
C                   AX = b
C
C                   for any vector b by factorising the inverse
C                   matrix into 2n factor matrices
C
C                   -1 (1) (2) (n) (n) (2) (1)
C                   A = R R ... R L ... L L
C
C                   where
C                   n = order of matrix
C                   R = right-hand factor matrix
C                   L = left-hand factor matrix
C
C                   the subroutine can also be used directly to solve
C                   a set of sparse symmetrical equations with
C                   complex coefficients and non-zero diagonal terms.
C
C   Reference        : K. Zollenkopf, "Bi-Factorisation" Conference on
C                   Large Sparse Set of Linear Equations, Oxford,
C                   1978.
C
C   Author           : Marckson Roberto Ferreira de Sousa - 1992
-----

```



```

c+
c Include Files.
c-
    Include 'TC_BASE.INC'
    Include 'TC_BLK2.INC'
    Include 'TC_07.CMN'
c+
c Parameters passed.
c-
    Integer#2 I1(N1f),
    &         K1(N1f),
    &         Nk, N1,
    &         Lfmax
    Complex#16 Y1(N1f),
    &         Zcte(Nkf),
    &         V(Nkf)
c+
c Local variables.
c-
    Integer#2 Itag(Lfmaxf),
    &         Lcol(Nkf),
    &         Lnxt(Lfmaxf),
    &         Noze(Nkf),
    &         Nseq(Nkf),
    &         Lf,
    &         i,
    &         ii,
    &         imin,
    &         ip,
    &         j,
    &         jend,
    &         jj,
    &         k,
    &         kp
    Integer#2 l,
    &         la,
    &         lamin,
    &         lang,
    &         lanu,
    &         li,
    &         lk,
    &         lmin,
    &         ln,
    &         lp,
    &         lst,
    &         n,
    &         min,
    &         na,
    &         ne,
    &         nn
    Complex#16 Ce(Lfmaxf), Cf,
    &         D,
    &         Sum,
    &         Xnull / (0.D0,0.D0) /      ! Null parameter
    Logical#2 Lgc

```

```

c -----
c TCB_F1
c
c Module Overview: From the topological information of the network,
c this module allocates the storage for the
c non-zero elements of the coefficient matrix A
c and establishes all the necessary sparsity
c information.
c -----

```

```

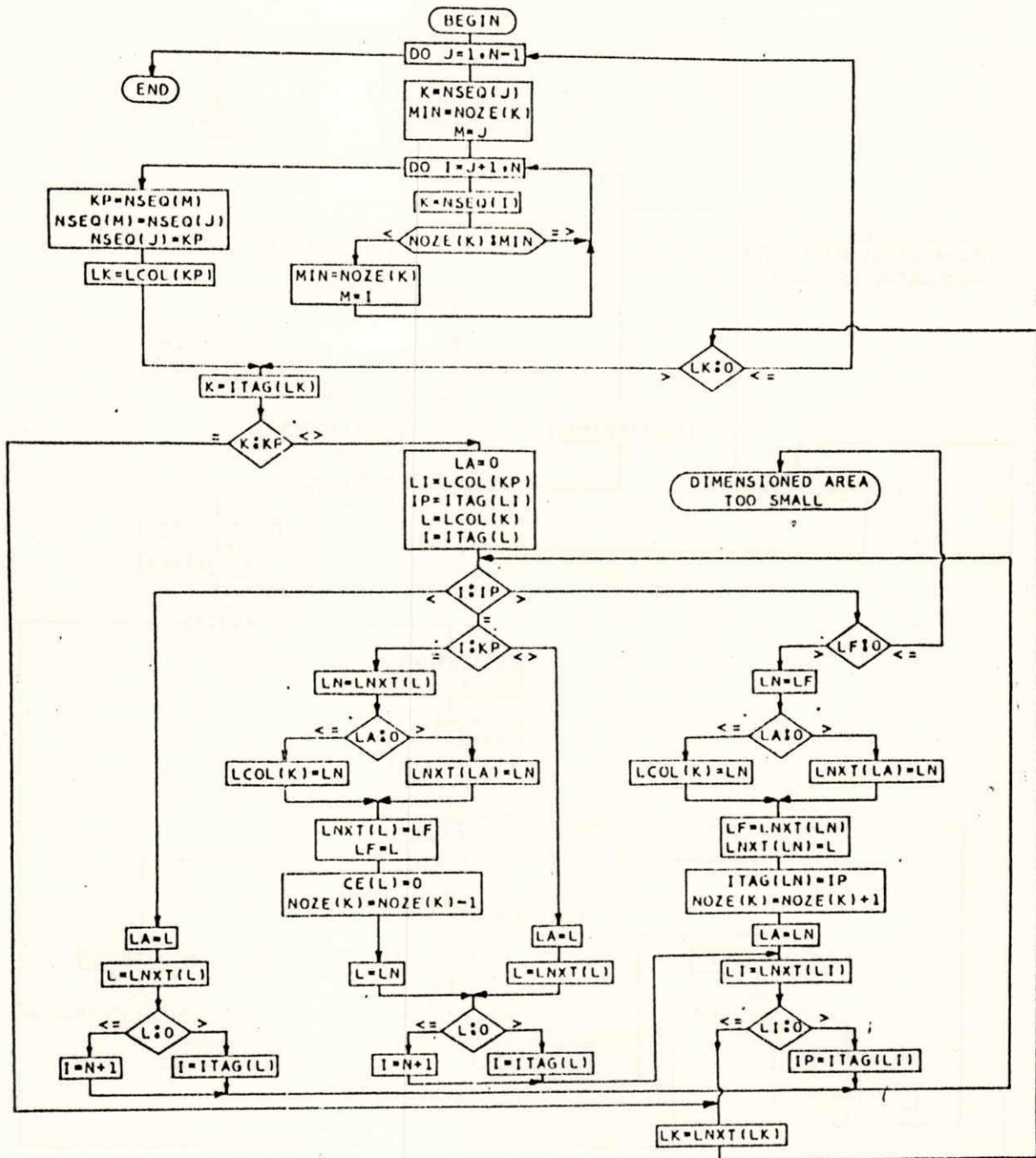
If ((Nk+2*Nl).gt.Lfmax) CALL Tcpric(1,1,'%PEGASUS-F-TCB_F1, dimen
& sioned area too small',1)
Do i = 1,Lfmax
  Ce(i) = Xnull
End do
Do i = 1,Nk
  lcol(i) = i
  itag(i) = i
  noze(i) = 1
  ce(i) = Zcte(i)
End do
Lf = Nk + 1
Do l = 1,Nl
  i = il(l)
  k = kl(l)
  If (i.NE.k) then
    If (i.GT.k) then
      n = i
      i = k
      k = n
    Endif
    itag(lf) = i
    ce(lf) = -Yl(l)
    noze(k) = Noze(k) + 1
    lk = lcol(k)
    Inxt(lk) = lf
    lcol(k) = lf
    lf = lf + 1
    itag(lf) = k
    ce(lf) = -Yl(l)
    noze(i) = noze(i) + 1
    li = lcol(i)
    Inxt(li) = lf
    lcol(i) = lf
    lf = lf + 1
    ce(i) = ce(i) + Yl(l)
    ce(k) = ce(k) + Yl(l)
  Endif
End do
Do k = 1,Nk
  If (CDabs(ce(k)).eq.0.D0) CALL Tcpric(1,1,'%PEGASUS-F-TCB_F1,
& Coefficient of diagonal equal zero [ BUS = '//Namev(k)// ' ],1)
End do
Do i = 1,Nk
  Inxt(lcol(i)) = 0

```

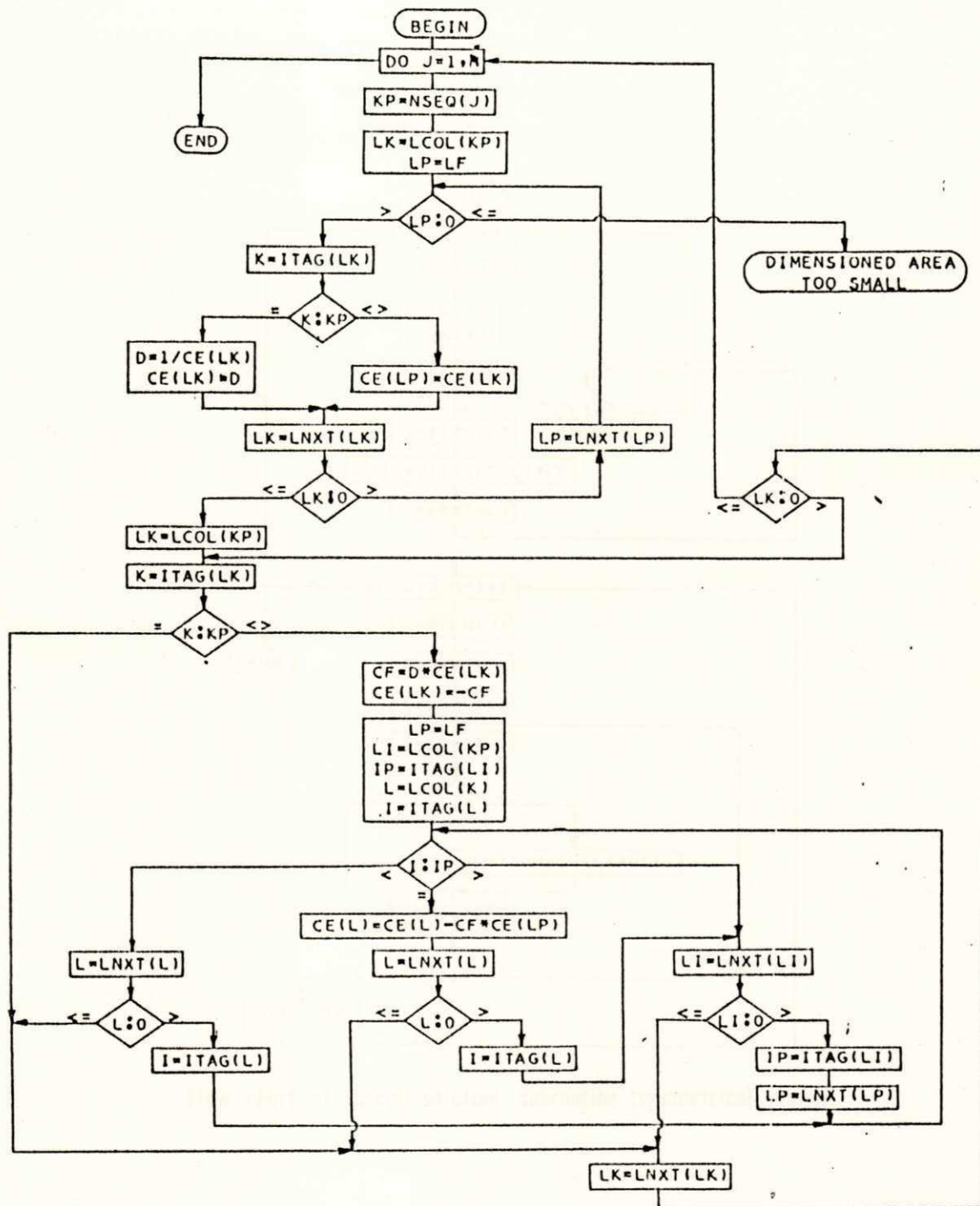
```

    lcol(i)      = i
    nseq(i)     = i
End do
If (lf.LT.lfmax) then
    Do i = lf,lfmax
        lnxt(i) = i + 1
    End do
Else if (lf.GT.lfmax) then
    lf = 0
Endif
lnxt(lfmax) = 0
Do k = 1,Nk
    lst = lcol(k)
    lang = 0
    Do while (lst.GT.0)
        imin = itag(lst)
        lmin = lst
        lamin = 0
        lanu = lst
        l = lnxt(lst)
        Do while (l.gt.0)
            If (itag(l).ne.imin) then
                If (itag(l).LT.imin) then
                    imin = itag(l)
                    lmin = l
                    lamin = lanu
                Endif
                lanu = l
                l = lnxt(l)
            Else
                ce(lmin) = ce(lmin) + ce(l)
                ce(l) = Xnull
                lnxt(lanu) = lnxt(l)
                lnxt(l) = lf
                lf = l
                l = lnxt(lanu)
                noze(k) = noze(k) - 1
            Endif
        End do
        If (lamin.GT.0) then
            lnxt(lamin) = lnxt(lamin)
        Else
            lst = lnxt(lmin)
        Endif
        If (lang.GT.0) then
            lnxt(lang) = lmin
        Else
            lcol(k) = lmin
        Endif
        lang = lmin
    End do
End do

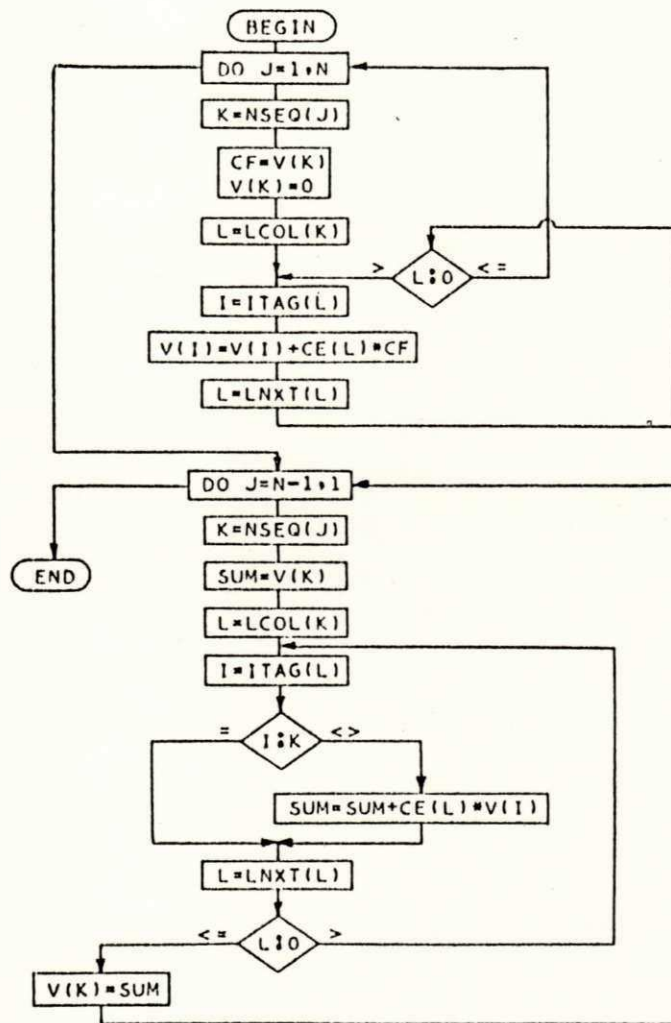
```



Flow chart of simulation and ordering subroutine (symmetrical matrix)



Flow chart of reduction subroutine (symmetrical matrix)



Flow chart of direct solution subroutine (symmetrical matrix)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFIA

Alden, Robert T. H. and Barna Szabados. "*Interactive FORTRAN for Power Engineering Education*". IEEE Transactions on Power Systems, vol. PWRS-1, No. 2, May 1986.

Borghini, Antoninho, João Carvalho Damas e Paulo Afonso da Silva Arriero. "*Simulador de Redes para Treinamento da Operação da Distribuição*". I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica. Vol. II, Operação e Manutenção. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Novembro 11-14, 1990.

Brameller, A., R. N. Allan and Y. M. Hamam.: Sparsity: Its practical application to systems analysis. Pitman Publishing, 1977.

Edminister, Joseph A. Circuitos Elétricos; tradução Lauro Santos Blandy; revisão técnica Rodrigo Araês Caldas Farias. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. Coleção Schaum.

Galindo, Ricardo de Vasconcelos, Carlos Henrique do Rego Feitosa e Francisco Antonio de A. Lima Viana. "Modelo Matemático para Automatização da Coordenação da Proteção". I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica. Vol. II, Operação e Manutenção. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Novembro 11-14, 1990.

Giguer, Sérgio. Proteção de Sistemas de Distribuição. SAGRA, 1988. 344p.

Huang, J. A. & F. D. Galiana.: *An Integrated personal Computer Graphics Environment for Power System Education, Analysis and Design*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol 6, Nº. 3, August 1991.

Macedo, Washington E., Marckson R. F. Sousa e João V. F. Neto.: "Utilização de métodos probabilísticos na análise de sistemas de energia elétrica". XV Reunião Regional da Associação Brasileira de Estatística, UFPb, Junho - 1989.

Salon, S. J. "*An Interactive Computer Graphics Package for Electric Power Engineering Education*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, No. 7, July 1983.

Stadlin, W. O. & Mckee A. D.: *Computational techniques for an Eletrical Distribution and Information Control System*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-101, No 2, February 1982.

Yu, David C., Shin-Tzo Chen and Roberto J. Kalscheur. "*A PC-Based Interactive Graphical Simulation and Analysis Package for A Power Plant Eletrical Auxiliary System*". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, No. 2, May 1990.

Zollenkopf, K.: "*Bi-factorisation: Basic Computational Algorithm and Programming Techniques*". In *Large Sparse Sets of Linear Equations*, pp. 75-96. Academic Press, 1971.