António Carvalho de Andrade

Simulação de Defeitos numa Rede de Energia

DEEC
FEUP
1996

DEPARTAMENTO DE

ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Simulação de Defeitos numa Rede de Energia Utilizando o Programa EMTP e de Algoritmos de Funcionamento de Relés Digitais

621.3(0...

FACULDADE DE ENGENHARIA

UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex – PORTUGAL

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Simulação de Defeitos numa Rede de Energia Utilizando o Programa EMTP e de Algoritmos de Funcionamento de Relés Digitais

621.3(043)/A1/Da/SIII
UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA
Nº 6365
CDU
Data

António Carvalho de Andrade

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos
requisitos do grau de mestre
em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Área de Especialização de Sistemas de Energia)

DEEC
FEUP

Dissertação realizada sob a supervisão de
Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro de 1996

Agradecimentos

Desejo agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva, pela disponibilidade, ajuda, confiança e empenho proporcionados ao longo do desenvolvimento da presente dissertação.

Em segundo lugar, à minha esposa e ao meu filho pela compreensão, paciência e apoio que sempre me dispensaram.

Resumo

O trabalho que deu origem a esta dissertação de mestrado em Engenharia Electrotécnica e Computadores (área de Sistemas de Energia) incluiu o estudo, análise e utilização do Programa EMTP - Electromagnetic Transients Program. Este programa foi utilizado para calcular a evolução temporal de ondas de tensão e intensidade de corrente em redes eléctricas especificando defeitos nessas redes. Estas evoluções temporais são utilizadas para simular o funcionamento de relés digitais utilizando algoritmos baseados na série de Fourier. Assim será possível verificar se relés instalados nas redes eléctricas se encontram correctamente regulados e coordenados.

O texto pode considerar-se dividido em quatro partes:

- na primeira parte apresenta-se uma breve descrição do programa EMTP e descrevem-se algumas das suas utilizações;
- na segunda parte são apresentados modelos teóricos e utilizados pelo EMTP para diversas componentes dos SEE. Visando esclarecer diversos aspectos associados à utilização do EMTP e pretendendo atingir objectivos de caracter didáctico apresentam-se diversos exemplos práticos;
- na terceira parte são descritos diversos aspectos de funcionamento de relés digitais e apresentados algoritmos para estimação de amplitudes de grandezas monitorizadas;
- na quarta parte é apresentado um caso de estudo utilizando uma rede baseada numa rede de distribuição portuguesa de dimensão mais realista.

Finalmente, no capítulo 8 as conclusões apresentam um balanço do trabalho realizado e apontam perspectivas de continuação deste trabalho.

Abstract

The work that lead to this master dissertation in Electrical and Computer Engineering (option of Energy Systems) included the study, analysis and use of the Electromagnetic Transients Program - EMTP - in order to simulate faults in electric networks. This program computes the temporal evolution of voltages and currents. These values are used to evaluate the performance of digital relays using algorithms based on Fourier series. This way it is possible to check if the settings of relays installed in electric networks are correct.

The text can be divided four parts:

- in the first one the EMTP is briefly described as well as some of its uses;
- in the second one presents theoretical models of several components of electric networks as well as the models used by EMTP. In order to highlight several issues related to the program one includes several small examples that are also used to reach didactic purposes;
- in the third part some basic issues related to the operation of digital relays are described. In this part some algorithms to estimate peak values of signals present in electric networks are also presented;
- in the fourth part it is presented a case study based on a real portuguese distribution network.

Finally, chapter 8 includes an overview of the work as well as the main conclusions and possible areas to be developed in the future.

Resumé

Le travail qui a été à l'origine de cette dissertation de maîtrise en Ingénierie Electrotechnique et d'Ordinateur (spécialisation en Systèmes d'Energie) inclu l'étude, l'analyse et l'utilisation du Programme EMTP - Electromagnetic Transients Program. Ce programme a été utilisé pour calculer l'évolution temporelle des ondes de tension et d'intensité du courant sur des réseaux électriques en spécifiant des défault. Ces évolutions temporelles sont utilisées pour simuler le fonctionnement de relais digitaux en utilisant des algorithmes basés sur la série de Fourier. On pourra par conséquent vérifier si les relais installés sur des réseaux électriques se trouvent correctement regulés et coordonnés.

Le text peut être divisé en quatre parties:

- Nous avons, dans une première partie, une brève description du programme EMTP où sont décrites quelques unes de ses utilisations;

- Dans une seconde partie, la présentation de modéles théoriques et utilisés par le EMTP pour différents composants des SEE. Plusieurs exemples pratiques sont présents afin d'éclaircir des aspects associés à l'utilisation du EMTP et atteindre des objectifs d'aspect didactique;

- Nous avons, dans une troisième partie, la description de plusieurs aspects du fonctionnement des relais digitaux ainsi que la présentation des algorithmes pour l'estimation des amplitudes de grandeurs monotorisés;

- Dans une quatrième partie nous avons la présentation d'un cas d'étude qui utilise un réseau basé sur un réseau de distribution portugais de dimension plus réaliste.

Pour terminer, dans le chapitre 8, les conclusions présentent um bilan du travail réalisé et ouvrent des perspectives de continuité de ce travail.

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Âmbito do Trabalho ---------- 2

1.2 - Objectivo do Trabalho ---------- 2

1.3 - Estrutura do Trabalho ---------- 3

2 - O PROGRAMA EMTP

2.1 - Introdução ---------- 6

2.2 - Áreas de Aplicação ---------- 6

2.3 - Exemplos de Aplicação ---------- 7

2.4 - Estrutura Geral do Programa ---------- 8

2.4.1 - A primeira linha ---------- 9

2.4.2 - Dados gerais ---------- 9

3 - MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

3.1 - Introdução ---------- 13

3.2 - Modelo de Parâmetros Distribuídos ---------- 13

3.2.1 - Aspectos Teóricos ---------- 13

3.2.2 - Modelo Utilizado pelo EMTP ---------- 17

3.2.3 - Formato dos Dados ---------- 18

3.3 - Esquema Equivalente em Π ---------- 21

3.3.1 - Aspectos Teóricos ---------- 21

3.3.2 - Modelo Utilizado pelo EMTP ---------- 24

3.3.3 - Formato dos Dados ---------- 25

3.4 - Exemplo 1 ---------- 26

3.4.1 - Dados da Simulação ---------- 26

3.4.2 - Resultados da Simulação ---------- 32

3.5 - Exemplo 2 ---------- 36

3.5.1 - Dados da Simulação ---------- 36

3.5.2 - Resultados da Simulação ---------- 37

4 - MODELIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES

4.1 - Introdução ---------- 43

4.2 - Modelo Teórico de Transformadores ---------- 43

4.2.1 - Transformadores Monofásicos ---------- 43

4.2.2 - Circuito Equivalente Referido a um Enrolamento ---------- 46

4.2.3 - Transformadores Trifásicos ---------- 47

4.3 - Programa EMTP ---------- 48

4.3.1 - Modelização do Transformador Monofásico ---------- 48

4.3.2 - Modelização do Transformador Trifásico ---------- 49

4.3.3 - Formato dos Dados ---------- 49

4.3.3.1 - Transformador Monofásico ---------- 49

4.3.3.2 - Transformador Trifásico ---------- 53

4.4 - Exemplo 3 ---------- 54

4.4.1 - Dados da Simulação ---------- 54

4.4.2 - Resultados da Simulação ---------- 56

5 - MODELIZAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO

5.1 - Introdução ---------- 60

5.2 - Aspectos Teóricos ---------- 60

5.3 - Modelo Utilizado pelo EMTP ---------- 73

5.4 - Formato dos Dados ---------- 76

5.4.1 - Definição do Estado Inicial e Ligação à Rede Eléctrica ---------- 76

5.4.2 - Parâmetros Especiais (opcionais) ---------- 77

5.4.3 - Parâmetros Eléctricos ---------- 78

5.4.4 - Parâmetros Mecânicos ---------- 81

5.5 - Exemplo 4 ---------- 82

5.5.1 - Dados da Simulação ---------- 82

5.5.2 - Resultados da Simulação ---------- 85

6 - ASPECTOS BÁSICOS SOBRE O FUNCIONAMENTO DE RELÉS DIGITAIS

6.1 - Introdução ---------- 90

6.2 - Constituição do Relé Digital ---------- 91

6.3 - Algoritmos Baseados na Forma de Onda ---------- 91

6.3.1 - Considerações Gerais ---------- 91

6.3.2 - Estimação de Estado ---------- 92

6.3.3 - Fonte de Erros ---------- 94

6.3.4 - Protecção Utilizando Estimativa de Parâmetros ---------- 95

6.3.5 - Algoritmo Utilizando a Transformada de Fourier ---------- 97

6.4 - Algoritmos Baseados em Modelos do Sistema de Energia ---------- 99

6.4.1 - Aspectos Básicos ---------- 99

6.4.2 - Erros Associados aos Algoritmos Utilizando Equações Diferenciais --------- 102

6.4.3 - Um Modelo mais Realista para Utilização dos Algoritmos Utilizando Equações Diferenciais ---------- 103

7 - ESTUDO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA - EXEMPLO5

7.1 - Dados da Simulação ---------- 106

7.2 - Resultados da Simulação ---------- 107

7.3 - Estimativa de parâmetros ---------- 116

8 - CONCLUSÕES ---------- 123

Referências e Bibliografia ---------- 127

ANEXO A (Listagem 3.2 - Ficheiro (exemplo1.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI sem acoplamentos) ------ 130

ANEXO B (Listagem 3.4 - Ficheiro (exemplo2.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI com acoplamentos) ------ 137

ANEXO C (Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador) ---------- 144

ANEXO D (Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores) ---------- 154

ANEXO E (Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real) ---------- 165

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.	Figura	Legenda
13	3.1	Modelo de parâmetros distribuídos
18	3.2	Modelo de parâmetros distribuídos utilizado pelo EMTP
22	3.3	Esquema equivalente em Π
25	3.4	Esquema equivalente em Π utilizado no programa EMTP
26	3.5	Esquema da rede e da linha onde se vai simular um curto-circuito
34	3.6	Tensões nos nós 3A, 3B e 3C antes e pós-defeito (curto-circuito monofásico) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π sem acoplamentos
34	3.7	Tensões nos nós 4A, 4B e 4C antes e pós-defeito (curto-circuito monofásico) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π sem acoplamentos
35	3.8	Intensidades de Corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 2C-3C e 4A-Terra antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π sem acoplamentos (escala reduzida)
36	3.9	Intensidades de Corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 2C-3C e 4A-Terra antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π sem acoplamentos (escala alargada)
39	3.10	Tensões nos nós 3A, 3B e 3C antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π com acoplamentos entre fases
39	3.11	Tensões nos nós 4A, 4B e 4C antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π com acoplamentos entre fases
40	3.12 3.13	Intensidades de corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 2C-3C e 4A-Terra antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π com acoplamentos entre fases
45	4.1	Circuito equivalente de um transformador monofásico
46	4.2	Circuito equivalente de um transformador monofásico com a representação dos circuitos de perdas no ferro e de magnetização
47	4.3	Circuito equivalente de um transformador monofásico referido ao enrolamento secundário

Pág.	Figura	Legenda
48	4.4	Circuito equivalente do modelo utilizado para o transformador monofásico
50	4.5	Circuito equivalente do modelo utilizado para o transformador trifásico
54	4.6	Esquema da rede do exemplo 3 onde se vai simular um curto circuito
58	4.7	Tensões nos nós 3A, 3B e 3C (terminais do enrolamento do lado primário do transformador inserido na rede)
58	4.8	Intensidades de corrente nos nós 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C, 5A-Terra, 5B-Terra e 5C-Terra situado no do lado secundário do transformador inserido na rede em cujos terminais foi simulado um curto circuito trifásico simétrico
62	5.1	Esquema eléctrico do alternador síncrono trifásico modelizado
69	5.2	Esquema do circuito electromecânico do alternador síncrono trifásico modelizado
73	5.3	Esquema do circuito eléctrico do alternador síncrono trifásico modelizado no EMTP
82	5.4	Esquema da rede onde se vai simular um curto circuito
88	5.5	Tensões nos nós 4A, 4B e 4C barramento comum a dois geradores síncronos trifásicos
88	5.6	Intensidades de corrente nos ramos 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C, 5A-Terra, interruptor e barramento onde foi provocado um curto circuito fase-terra
90	6.1	Hierarquia de equipamento numa subestação
91	6.2	Constituição de um relé digital
100	6.3	Modelo da linha com defeito
103	6.4	Modelo mais realista da linha com defeito
106	7.1	Esquema da rede de distribuição de energia do exemplo 5 onde se vai simular um curto circuito trifásico simétrico
111	7.2	Tensões nos nós 10A, 10B e 10C nó onde foi simulado um curto circuito trifásico simétrico
111	7.3	Intensidades de corrente nos ramos 7A-9A, 7B-9B, 7C-9C, 10A-Terra, 10B-Terra e 10C-Terra

Pág.	Figura	Legenda
112	7.4	Tensões nos nós 3A, 3B e 3C
112	7.5	Tensões nos nós 4A, 4B e 4C
113	7.6	Tensões nos nós 7A, 7B e 7C
113	7.7	Tensões nos nós 11A, 11B e 11C
114	7.8	Tensões nos nós 15A, 15B e 15C
114	7.9	Intensidades de corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 2C-3C
115	7.10	Intensidades de corrente nos ramos 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C
115	7.11	Intensidades de corrente nos ramos 4A-6A, 4B-6B, 4C-6C
116	7.12	Intensidades de corrente nos ramos 7A-8A, 7B-8B, 7C-8C

ÍNDICE DE TABELAS

Pág.	Tabela	Legenda
9	2.1	Formato dos dados da primeira linha do programa de uma simulação
9	2.2	Formato dos dados gerais (valores reais)
10	2.3	Formato dos dados gerais (valores inteiros)
19	3.1	Formato dos dados da linha de parâmetros distribuídos com precisão normal
19	3.2	Formato dos dados da linha de parâmetros distribuídos com alta precisão
20	3.3	Valores possíveis para os campos ILINE, A e B
25	3.4	Formato dos dados da primeira linha de uma linha em equivalente Π
25	3.5	Formato dos dados de uma linha adoptando o esquema equivalente Π
26	3.6	Formato dos dados de uma linha adoptando o esquema equivalente Π
29	3.7	Formatação dos dados da impedância da fonte
30	3.8	Formatação dos dados de um interruptor
31	3.9	Formatação dos dados de uma fonte de energia eléctrica
32	3.10	Formatação dos dados das variáveis de saída
51	4.1	Formato dos dados da primeira linha
52	4.2	Formato dos dados para especificar o tipo de magnetização
52	4.3	Código especial para terminar a curva de magnetização
52	4.4	Formato dos dados dos enrolamentos
53	4.5	Formato dos dados das 2ª e 3ª unidades dos transformadores trifásicos
53	4.6	Formato dos dados das 2ª e 3ª unidades dos transformadores trifásicos
76	5.1	Formato dos dados definindo os nós de ligação à rede eléctrica
77	5.2	Formato da linha definindo os parâmetros associados a tolerâncias
77	5.3	Formato da linha definindo os parâmetros de distinção de dados
78	5.4	Formato da linha definindo a ligação em triângulo do estator
78	5.5	Formato da primeira linha de parâmetros eléctricos
79	5.6	Formato da segunda linha de parâmetros eléctricos
80	5.7	Formato da terceira linha de parâmetros eléctrico
81	5.8	Formato da linha de parâmetros mecânicos

ÍNDICE DE TABELAS

Pág.	Tabela	Legenda
117	7.1	Tensões nos nós 10A, 10B e 10C medidas (M) e parâmetros estimados (E)
119	7.2	Intensidades de corrente nos ramos 7A-9A, 7B-9B e 7C-9C medidas (M) e parâmetros estimados (E)
121	7.3	Tensões nos nós 3A, 3B e 3C medidas (M) e parâmetros estimados (E)

Capítulo 1

Introdução

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Âmbito do trabalho

A industrialização crescente, fruto de uma evolução tecnológica que já se iniciou há várias décadas, mas que actualmente atinge níveis nunca antes alcançados, cria uma dependência, cada vez maior, de energia em geral e, em especial, de energia eléctrica.

Os Sistemas Eléctricos de Energia (SEE), sistemas que integram em si subsistemas de produção, transporte e distribuição, são cada vez mais complexos e de maiores dimensões. Para fazerem face, por um lado, ao aumento de consumo de energia eléctrica, acompanhando a crescente industrialização e ao aumento do nível de vida das populações e, por outro lado, à crescente dependência da nossa sociedade em relação à energia eléctrica, é imposta uma exigência acrescida na qualidade do produto energia e na continuidade do seu fornecimento.

Neste âmbito, os sistemas de protecção são cada vez mais importantes, a fim de aumentar a fiabilidade e a qualidade de serviço dos SEE. Torna-se imprescindível que os componentes avariados do SEE possam ser automaticamente identificados e retirados de serviço, de uma maneira rápida e eficiente, com o mínimo de perturbação no SEE. Para atingir este objectivo, os Sistemas de Protecção viram, também, a sua complexidade aumentada. Hoje em dia, em substituição de relés electromagnéticos, utilizam-se relés digitais. Incorporam recentes evoluções tecnológicas, na área da aquisição e processamento de grandes quantidades de informação, graças aos avanços na velocidade de processamento e crescente embaratecimento dos microprocessadores.

1.2 - Objectivo do trabalho

O objectivo do presente trabalho consiste, em primeiro lugar, em estudar de forma aprofundada o programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Este programa permite simular defeitos em redes eléctricas de energia, e calcular os valores instantâneos assumidos pela tensão e intensidade de corrente antes e pós-defeito.

Em segundo lugar, pretende-se estudar diversos algoritmos de funcionamento de relés digitais que são cada vez mais utilizados dadas as suas performance, flexibilidade, facilidade de

programação, baixo custo e possibilidade de inserção em sistemas hierarquizados de controlo e monitorização dos Sistemas Eléctricos de Energia.

O programa EMTP permite, como já foi referido, obter a evolução temporal das ondas de tensão e intensidade de corrente antes e após situação de defeito. Os valores assim disponibilizados poderão ser utilizados para avaliar o módulo e a fase da intensidade de corrente e da tensão e o valor da impedância aparente utilizando os algoritmos referidos anteriormente.

Pretende-se, assim, estudar um conjunto de aplicações e algoritmos que permitirão, no futuro, construir um simulador da actuação de protecções digitais instaladas ou a instalar em Sistemas Eléctricos de Energia. Um sistema deste género poderá desempenhar um papel importante na ajuda do Engenheiro, sempre que se pretende avaliar o desempenho de relés instalados na rede ou estudar as causas de incidentes que possam ter ocorrido. De algum modo, pretende-se contribuir para melhorar a segurança de exploração dos sistemas, numa altura em que a desregulamentação do sector eléctrico poderá obrigar a que os Sistemas Eléctricos sejam explorados em situações mais próximas dos seus limites técnicos.

1.3 - Estrutura do trabalho

Após esta introdução, apresenta-se no capítulo 2 uma breve descrição do programa EMTP, áreas de aplicação, parâmetros gerais dos dados de entrada e sua formatação. Estes dados serão utilizados nos exemplos práticos apresentados nos capítulos posteriores.

No capítulo 3 são descritos aspectos teóricos dos modelos de parâmetros distribuídos e equivalente em Π de linhas de transmissão de energia, e dos modelos utilizados, para o mesmo componente, pelo EMTP. Na parte final, apresentam-se vários exemplos práticos que permitem clarificar alguns aspectos de utilização do programa e com que se pretende atingir objectivos didácticos.

O capítulo 4 descreve, de forma necessariamente breve, o modelo teórico de transformadores monofásicos e trifásicos, os modelos utilizados pelo EMTP para os mesmos transformadores e, por último, apresenta-se um exemplo prático com o objectivo de clarificar alguns aspectos de utilização do programa e com que se pretende também atingir objectivos didácticos.

O capítulo 5 inclui informação relativa a geradores síncronos trifásicos, modelo teórico e modelo utilizado pelo programa EMTP terminàndo com a apresentação de um exemplo prático, com os mesmos objectivos já definidos nos dois últimos capítulos.

No capítulo 6 são descritos alguns aspectos de funcionamento de relés digitais. São apresentados nomeadamente algoritmos para estimação de valores eficazes baseados na série de Fourier e um algoritmo baseado na formulação de um conjunto de equações diferenciais.

No capítulo 7 é apresentado um caso de estudo utilizando uma rede de distribuição de energia de dimensão mais realista e baseada numa rede de distribuição portuguesa. O programa EMTP é utilizado para avaliar a evolução temporal das intensidades de corrente e das tensões na rede face a defeitos utilizando-se, em seguida, algoritmos baseados na série de Fourier para estimar valores eficazes e fases destas grandezas.

No capítulo 8 incluem-se algumas conclusões e perspectivas de continuação deste trabalho.

Na parte final do trabalho, é incluído um conjunto de anexos integrando as listagens dos resultados obtidos utilizando o programa EMTP, com a simulação dos exemplos práticos referidos nos capítulos anteriores.

Capítulo 2

O Programa EMTP

2 - O PROGRAMA EMTP

2.1 - Introdução

O programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) foi desenvolvido no inicio da década de sessenta por uma equipa de investigadores norte-americanos. O programa EMTP tem sido utilizado por universidades de vários continentes, em acções de investigação, e por empresas de produção e transporte de energia no projecto de Sistemas Eléctricos de Energia e na análise de diversas situações de defeito. Ao longo dos anos o programa EMTP tem tido sucessivos melhoramentos introduzidos pelos vários utilizadores, acrescentando-lhe novos modelos e alargando o seu campo de aplicação.

2.2 - Áreas de aplicação

O EMTP é um software que permite simular transitórios electromagnéticos, electromecânicos e a actuação de sistemas de controlo em Sistemas Eléctricos de Energia. Podem ser realizados, entre outros, estudos de [12]:

- Sobretensões de manobra;
- Sobretensões provocadas por descargas atmosféricas;
- Coordenação de isolamentos;
- Esforços torcionais nas chumaceiras de máquinas;
- Comportamento de linhas de alta tensão de corrente contínua;
- Compensação de potência reactiva;
- Propagação de ondas a diferentes frequências nas linhas eléctricas;
- Harmónicos;
- Ferroressonâncias;
- Actuação de sistemas de controlo;
- Comportamento de terras;

- Fontes alternativas de energia;

- Transposição de fases;

- Protecção de condensadores série.

O EMTP apresenta, como se pode constatar, um vasto campo de aplicação. Este facto encontra-se relacionado, sem dúvida, com a diversidade de modelos de componentes dos SEE que integra, permitindo assim a simulação de situações próximas da realidade.

2.3 - Exemplos de aplicação

Como foi referido no ponto anterior, o programa EMTP é utilizado em diversas áreas. A título de exemplo e, sem preocupações de exaustão, apresentam-se agora algumas referências bibliográficas ilustrativas de aplicação deste programa.

Assim em [11] o EMTP é utilizado no estudo do comportamento de transformadores de intensidade de corrente. Sendo o transformador de intensidade de corrente um componente fundamental dos Sistemas de Protecção, é fundamental, a análise da sua resposta a variações bruscas da intensidade de corrente. Nesta referência é utilizado um modelo de transformador com saturação existente no EMTP (*Type 98*) para a obtenção de curvas características (V-I) e (fluxo-I) do transformador de intensidade de corrente. São também descritos testes realizados em laboratórios de alta tensão em idênticas condições de operação. A comparação dos resultados obtidos no laboratório com os resultados das simulações efectuadas com a utilização do EMTP permitem validar o modelo utilizado.

Em [16] o EMTP é utilizado no estudo de harmónicos produzidos por indutâncias não lineares. Neste artigo são descritas as alterações/extensões introduzidas no EMTP para realizar este tipo de estudos.

Em [3] é descrito outra utilização do EMTP para estudos de harmónicos. Ao método descrito - HRREM - Harmonic Reduced Rank Extrapolation - são apontadas vantagens em relação a outros métodos já utilizados no EMTP.

Em [15] é descrito a utilização do EMTP para identificar estratégias que permitam diminuir ressonâncias subsincronas utilizando sistemas de controlo por tiristores em sistemas de compensação série de linhas de transmissão de energia.

A simulação do controlo por microprocessador de SVC (*Static Var Compensador*) é apresentada na referência [6]. Na identificação de estratégias óptimas de compensação de cargas indutivas é utilizado o módulo TACS (*Transiente Analysis of Control Systems*) integrando o EMTP.

Em [17] é proposto um novo modelo de transformador trifásico possuindo núcleo de colunas e com acoplamentos magnéticos a integrar o EMTP.

Finalmente, em [14] o EMTP é utilizado na análise dos harmónicos e efeito de fliker produzidos por fornos de arco eléctrico. O modelo utilizado para o forno de arco eléctrico equipara-o a uma fonte de tensão controlada. Este novo modelo permite modificar a caracteristica V-I nas diferentes condições de operação.

2.4 - Estrutura geral do programa

Os dados de entrada para análise de fenómenos transitórios de uma dada simulação que se pretende estudar são organizados em grupos (classes), e a sua colocação deverá seguir a seguinte ordem:

- Dados que definem o início de uma nova simulação, começando por " BEGIN NEW DATA CASE" e incluindo parâmetros gerais do problema;
- Dados sobre modelos de sistemas de controle (TACS), incluindo funções de transferência;
- Dados sobre os ramos da rede em estudo (lineares ou não lineares), transformadores, linhas de transmissão ou cabos, terminando com "BLANK CARDS";
- Dados sobre os interruptores da rede eléctrica, díodos e tiristores, terminando com "BLANK CARDS";
- Dados sobre as fontes de energia ligados ao sistema eléctrico;
- Dados para a realização de estudos de trânsitos de potência;

- Dados para definir ou calcular as condições iniciais da simulação;

- Dados para definir as variáveis de saída, terminando com um "BLANK CARDS";

Os dados de entrada para simular fenómenos transitórios, utilizando o programa EMTP, são previamente digitados com a ajuda de um editor de texto (por exemplo EDIT do DOS). São gravados com extensão **.dat, e têm que cumprir as regras rígidas de sintaxe definidas em [2]. As linhas do ficheiro de dados têm um comprimento máximo de 80 caracteres.

2.4.1 - A primeira linha

A tabela 2.1, mostra a formatação da primeira linha do programa para realizar uma simulação. Os caracteres têm que ser colocados na posição indicada. Caso contrário a simulação é abortada.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
BEGIN NEW DATA CASE

Tabela 2.1 - Formato dos dados da primeira linha do programa de uma simulação

2.4.2 - Dados gerais

Após a digitação da primeira linha, é necessário definir um conjunto de parâmetros gerais representados por valores reais (tabela 2.2).

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
E8.0	E8.0	E8.0	E8.0	E8.0	E8.0	E8.0	
DELTAT	TMAX	XOPT	COPT	EPSILN	TOLMAT	TSTART	

Tabela 2.2 - Formato dos dados gerais (valores reais)

Nesta tabela:

DELTAT: Passo a utilizar no processo de integração numérica (em segundos);

TMAX: Tempo máximo da simulação (em segundos);

- Valor igual a três: imprime os fluxos nos ramos, nos interruptores e as injecções das fontes em tabela de 80 caracteres;

MAXOUT: Igualando este parâmetro a zero são calculados e impressos os valores máximos das variáveis.

IPUN: É necessário colocar este parâmetro com o valor "-1" para incluir uma linha adicional , definindo a periodicidade da escrita das variáveis de saída;

MENSAV: Igualando este parâmetro a um, o disco é utilizado como memória;

ICAT: Opção relacionada com o tipo de gravação de ficheiro de dados com as seguintes hipóteses:

- Valor igual a zero: não é gravado o ficheiro *.pl4;
- Valor igual a um: é gravado o ficheiro *.pl4, mas são ignorados os dados gráficos;
- Valor igual a dois: é gravado o ficheiro *.pl4 e não são ignorados os dados gráficos;

NENERG: Para realizar uma simulação determinística este campo deverá vazio. A simulação poderá, também, ser realizada especificando o número total de energizações considerando dados de natureza estatística ou a realização sistemática de um certo número de estudos;

IPRSUP: Este parâmetro é colocado normalmente a zero.

Ao longo deste trabalho, caso a caso, será explicada a formatação dos dados associados aos vários exemplos que serão apresentados.

Capítulo 3

Modelos de Linhas de Transmissão de Energia Eléctrica

3 - LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

3.1 - Introdução

Por razões estratégicas ou associadas à localização dos recursos energéticos, a energia eléctrica é produzida, com frequência, longe dos centros de consumo. As linhas de transmissão de energia são os elementos do SEE que transportam a energia eléctrica dos centros produtores até aos centros consumidores. Deste modo, revela-se importante estudar os modelos de linhas de transmissão de energia de forma a modelizar um SEE de forma adequada. Em seguida são analisados dois modelos de linhas de transmissão de energia eléctrica incluídos no programa EMTP.

3.2 - Modelo de parâmetros distribuídos

3.2.1 - Aspectos teóricos

Os condutores utilizados nas linhas de transmissão de energia caracterizam-se por possuírem uma impedância distribuída ao longo do seu comprimento, e de igual modo também a sua admitância de fugas. Consequentemente, a intensidade de corrente e a tensão variam continuamente, ao longo da linha.

Como os parâmetros que caracterizam a linha têm carácter distribuído, é possível representar um elemento da linha de comprimento infinitesimal dx pelo esquema apresentado na figura 3.1[3].

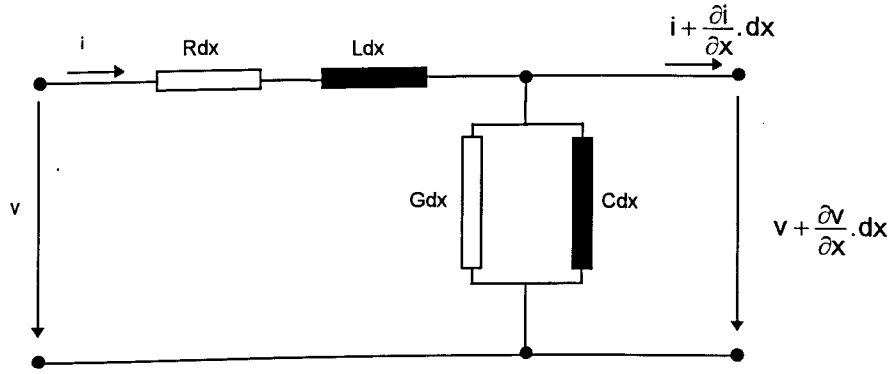


Figura 3.1 - Modelo de parâmetros distribuídos

XOPT: Coloca-se este parâmetro a zero se as indutâncias estiverem em mH ou o valor da frequência para cálculo de reactâncias;

COPT: Coloca-se este parâmetro a zero se as capacidades estiverem em μF ou o valor da frequência para cálculo de reactâncias;

EPSILIN: Tolerância para avaliar a singularidade da parte real da matriz de admitâncias;

TOLMAT: Tolerância para comprovar a singularidade da matriz de admitâncias;

TSART: Início da simulação (instante inicial) em segundos.

A tabela 2.3, apresenta a formatação de uma linha de parâmetros gerais assumindo valores inteiros.

I8	I8	I8	I8	I8	I8	I8	I8	I8	I8
IOUT	IPLOT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT	IPUN	MEMSAV	ICAT	NERERG	IPRSUP

Tabela 2.3 - Formato dos dados gerais (valores inteiros)

Nesta tabela:

IOUT: Periodicidade da gravação de dados no ficheiro de saída de dados para um ficheiro texto (*.lis);

IPLOT: Periodicidade da gravação de dados no ficheiro de saída de dados para a plotter (*.pl4);

IODUBL: Coloca-se este parâmetro a zero se se pretender realizar a impressão da tabela dos nós, ou seja, a tabela das ligações entre nós (consultar, por exemplo, as listagens dos resultados dos exemplos nos anexos);

KSSOUT: Opção associada ao tipo de dados a imprimir em regime permanente. Encontram-se previstas as seguintes hipóteses:

- Valor igual a zero: não imprime nada;
- Valor igual a um: imprime os fluxos nos ramos, nos interruptores e as injecções das fontes;
- Valor igual a dois: imprime os fluxos nos ramos e nos interruptores;

Em relação à figura 3.1:

i - intensidade de corrente de entrada;

v - tensão de saída;

R - resistência por unidade de comprimento;

L - indutância por unidade de comprimento;

G - condutância por unidade de comprimento;

C - capacidade por unidade de comprimento.

A intensidade de corrente e a tensão de saída serão dadas pelas expressões:

$$i + \frac{\partial i}{\partial x}.dx \tag{3.1}$$

$$v + \frac{\partial v}{\partial x}.dx \tag{3.2}$$

Aplicando as leis das malhas e dos nós de Kirchhoff ao circuito da figura 3.1, e desprezando os infinitésimos de 2ª ordem, obtêm-se as equações (3.3) e (3.4) que relacionam a intensidade de corrente e a tensão.

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = Ri + L\,\frac{di}{dt} \tag{3.3}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = GV + C\,\frac{dv}{dt} \tag{3.4}$$

Estas são equações gerais de funcionamento das linhas de transmissão, válidas para os regimes permanente e transitório.

Consideremos, agora, o caso particular em que as linhas se encontram a funcionar em regime permanente sinusoidal. Aplicando, neste caso, a transformada de Steinmetz às equações (3.3) e (3.4), obtêm-se as expressões:

$$-\frac{d\underline{V}}{dx} = R\underline{I} + j\omega L\underline{I} \tag{3.5}$$

$$-\frac{d\underline{I}}{dx} = G\underline{V} + j\omega C\underline{V} \qquad (3.6)$$

A impedância e a admitância por unidade de comprimento, são definidas como sendo respectivamente:

$$\underline{Z} = R + j\omega L \qquad (3.7)$$

$$\underline{Y} = G + j\omega C \qquad (3.8)$$

Substituindo estas últimas expressões nas equações (3.5) e (3.6), obtêm-se:

$$-\frac{d\underline{V}}{dx} = (R + j\omega L)\ \underline{I} = \underline{Z}.\underline{I} \qquad (3.9)$$

$$-\frac{d\underline{I}}{dx} = (G + j\omega C)\ \underline{V} = \underline{Y}.\underline{V} \qquad (3.10)$$

Resolvendo a equação (3.10) em ordem a $\underline{V}$ e substituindo, em seguida, o resultado em (3.9) obtem-se a equação (3.11). De uma forma análoga, é possível obter a equação (3.12).

$$\frac{d^2\underline{I}}{dx^2} = \underline{Y}.\underline{Z}.\underline{I} \qquad (3.11)$$

$$\frac{d^2\underline{V}}{dx^2} = \underline{Z}.\underline{Y}.\underline{V} \qquad (3.12)$$

O sistema de equações anterior é constituído por duas equações diferenciais de 2ª ordem de coeficientes constantes cuja solução geral é dada pelas expressões (3.13) e (3.14).

$$\underline{V}(x) = \underline{C}_1.\mathrm{ch}\ \underline{\gamma}x + \underline{C}_2.\mathrm{sh}\underline{\gamma}x \qquad (3.13)$$

$$\underline{I}(x) = \underline{C}_3.\mathrm{ch}\ \underline{\gamma}x + \underline{C}_4.\mathrm{sh}\underline{\gamma}x \qquad (3.14)$$

Nestas expressões, $\underline{\gamma}$ é a constante de propagação que se pode exprimir por:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}.\underline{Y}} \qquad (3.15)$$

Definindo as condições fronteira, isto é, conhecidas, por exemplo, a tensão e a intensidade de corrente na extremidade emissão da linha e substituindo-as nas expressões (3.13) e (3.14) obtêm-se:

$$\underline{V}(0) = \underline{C}_1.1 + \underline{C}_2.0 \qquad (3.16)$$

$$\underline{I}(0) = \underline{C}_3.1 + \underline{C}_4.0 \qquad (3.17)$$

É possível, agora, calcular as constantes $\underline{C}_1$ e $\underline{C}_3$. Substituindo, em seguida, as mesmas constantes nas expressões (3.13) e (3.14) obtêm-se:

$$\underline{V}(x) = \underline{V}(0).\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}x + \underline{C}_2.\mathrm{sh}\underline{\gamma}x \qquad (3.18)$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}(0).\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}x + \underline{C}_4.\mathrm{sh}\underline{\gamma}x \qquad (3.19)$$

Resolvendo as equações (3.11) e (3.12) considerando as expressões de $\underline{V}$ e $\underline{I}$ dadas por (3.18) e (3.19), obtêm-se as expressão para as constantes $\underline{C}_2$ e $\underline{C}_4$ que serão:

$$\underline{C}_2 = \frac{R + j\omega L}{\sqrt{Z.Y}}.\underline{C}_3 \qquad (3.20)$$

$$\underline{C}_4 = \frac{G + j\omega C}{\sqrt{Z.Y}}.\underline{C}_1 \qquad (3.21)$$

A constante de propagação (3.15) também pode ser expressa da seguinte forma:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z.Y}} = \alpha + j\beta \qquad (3.22)$$

sendo α, a parte real, o coeficiente de atenuação das ondas de tensão e intensidade de corrente por unidade de comprimento e β, a parte imaginária, a constante de fase das ondas de tensão e corrente por unidade de comprimento.

O ângulo característico da linha θ é igual ao produto:

$$\theta = \underline{\gamma}.\ell \qquad m^{-1} \qquad (3.23)$$

em que ℓ é o comprimento da linha.

A impedância característica da linha ou impedância de onda será igual:

$$\underline{Z}c = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \quad \Omega \tag{3.24}$$

Substituindo nas expressões (3.20) e (3.21) a expressão (3.24), e atendendo aos valores de $\underline{C}_1$ e $\underline{C}_3$, as constantes $\underline{C}_2$ e $\underline{C}_4$ são dadas por:

$$\underline{C}_2 = -\,\underline{Z}c.\underline{I}(0) \tag{3.25}$$

$$\underline{C}_4 = -\,\frac{1}{\underline{Z}c}.\underline{V}(0) \tag{3.26}$$

Finalmente, obtêm-se as equações que regem o funcionamento da linha em regime permanente sinusoidal, também chamadas equações dos telegrafistas, substituindo as expressões (3.25) e (3.26) nas equações (3.18) e (3.19).

$$\underline{V}(x) = \underline{V}(0).\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}x - \underline{Z}c.\underline{I}(0).\mathrm{sh}\underline{\gamma}x \tag{3.27}$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}o.\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}x - \frac{\underline{V}(0)}{\underline{Z}c}.\mathrm{sh}\underline{\gamma}x \tag{3.28}$$

3.2.2 - Modelo utilizado pelo EMTP

O programa EMTP permite modelizar linhas em que ocorre ou não a transposição dos condutores de fase utilizando, nomeadamente, a decomposição em componentes de Clarke.

Independentemente do modelo utilizado pelo programa EMTP, o esquema utilizado é mostrado na figura 3.2 [2]. A mesma figura representa uma secção incremental Δx de uma fase da linha.

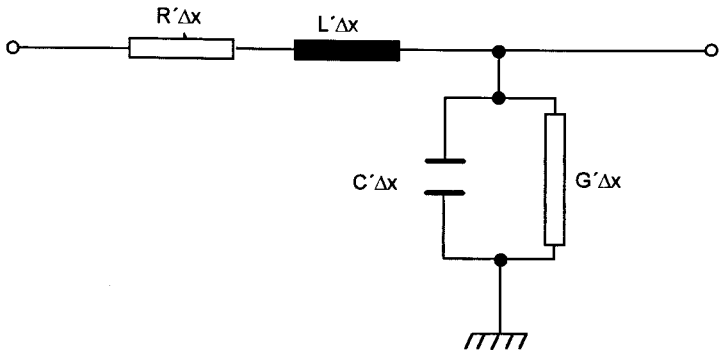


Figura 3.2 - Modelo de parâmetros distribuídos utilizado pelo EMTP

As equações utilizadas para uma linha trifásica são:

$$-\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = [L]\frac{\partial \bar{i}}{\partial t} + [R].\bar{i} \qquad (3.29)$$

$$-\frac{\partial \bar{i}}{\partial x} = [C]\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + [G].\bar{v} \qquad (3.30)$$

Nestas equações $\bar{v}$ e $\bar{i}$ representam os vectores de tensão e intensidade de corrente complexas num ponto x da linha. $[R]$, $[L]$, $[G]$ e $[C]$ são matrizes integrando valores de resistências, indutâncias, condutâncias e capacidades. Como se verifica, o programa EMTP admite a existência de acoplamentos indutivos ou capacitivos.

As matrizes [R], [L] e [C] podem ser determinadas com a ajuda de programas existentes no EMTP (rotinas "LINE CONSTANTES" e "CABLE CONSTANTE").

3.2.3 - Formato dos dados

O formato dos dados da linha de parâmetros distribuídos adoptando precisão normal (números com seis dígitos) é mostrado na tabela 3.1, e com alta precisão (números com doze dígitos) na tabela 3.2.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	2 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	3 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	4 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	5 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	6 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	7 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	8 0
ITYPE	node name	reference br.	Resist. R′ [ohm/length]	A	B	LENGHT	ILINE	IPUNCH / IPOSE	IOUT
	BUS 1 / BUS 2	BUS 3 / BUS 4							
I2	A6 / A6	A6 / A6	E6.2	E6.2	E6.2	E6.2	I2	I2 / I2	I1

Tabela 3.1 - Formato dos dados da linha de parâmetros distribuídos com precisão normal

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	2 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	3 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	4 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	5 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	6 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	7 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	8 0
ITYPE	node name		Resistance R′ [ohm/length]	A	B	Length	IBINE	IPUNCH / IPOSE	IOUT
	BUS 1 / BUS 2								
I2	A6 / A6		E12.2	E12.2	E12.2	E12.2	I2	I2 / I1	I1

Tabela 3.2 - Formato dos dados da linha de parâmetros distribuídos com alta precisão

Os parâmetros que figuram nestas tabelas são:

ITYPE: Número da fase a que correspondem os dados (-1,-2,-3,...,-N), e também é o código para as linhas de dados do modelo de parâmetros distribuídos;

BUS1, BUS2: Nome dos nós desta fase (extremos da linha) com o máximo de 6 caracteres. Se um dos nós estiver ligado à terra, o nome desse nó fica em branco;

BUS3, BUS4: Nome dos nós do ramo, que por ter características iguais, se pode tomar como referência;

R: resistência em ohm/unidade de comprimento.

A: Depende do campo ILINE (ver tabela 3.3);

B: Depende do campo ILINE (ver tabela 3.3);

LENGTH: Comprimento total da linha. O valor do comprimento deverá ser positivo nos casos em que os condutores da linha são transpostos (IPOSE = 0) e negativo para os restantes casos (IPOSE > 0);

ILINE: Define os campos A e B. A tabela 3.3, define os três possíveis valores para ILINE, A e B;

IPUNCH: Campo em que é definido o tipo de modelo escolhido e que poderá ter os seguintes valores:

0 - modelo usual (*lumped-resistiv modelling*), salvo se for colocado nos dados de entrada "*EXACT PHASOR REQUEST*";

1 - modelo sem distorsão (*distortionless-mode modelling*);

IPOSE: Campo onde é especificado se a linha tem transposição de fases ou não:

0 - linha com transposição de condutores;

1 - linha sem transposição de condutores;

ILINE	A	B
0 (não vazio)	- indutância L′ em mH/unidade de comprimento se XOPT = 0 - reactância ωL′ em Ω/unidade de comprimento e frequência $\frac{\omega}{2\pi}$ = XOPT	- capacitância C′ em μF/unidade de comprimento se COPT = 0 - susceptância ωC′ em μS/unidade de comprimento e frequência $\frac{\omega}{2\pi}$ = COPT
1	Impedância característica modal Z_c em ohm: $Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$	Velocidade de propagação em unidades de comprimento /s $v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$
2	Impedância característica modal Z_c em ohm: $Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$	Tempo de propagação modal τ (em segundos) $\tau = \frac{\ell}{v} = \sqrt{L'C'}.\ell$

Tabela 3.3 - Valores possíveis para os campos ILINE, A e B

IOUT: Neste campo são definidas as variáveis de saída:

1 - intensidade de corrente nos ramos;

2 - tensão nos nós extremos dos ramos;

3 - intensidade de corrente nos ramos e tensões nos nós extremos dos ramos;

4 - potência veiculada pelo ramo e perdas nos mesmos ramos;

3.3 - ESQUEMA EQUIVALENTE EM Π

3.3.1 - Aspectos teóricos

Como se verificou em 3.2.1 as equações que regem o funcionamento de uma linha em regime permanente e sinusoidal são dadas por:

$$\underline{V}(x) = \underline{V}(0).\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}x - \underline{Zc}.\underline{I}(0).\mathrm{sh}\underline{\gamma}x \tag{3.31}$$

$$\underline{I}(x) = \underline{Io}.\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}x - \frac{\underline{V}(0)}{\underline{Zc}}.\mathrm{sh}\underline{\gamma}x \tag{3.32}$$

Utilizando notação matricial e fazendo $x = \ell$, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}(\ell) \\ \underline{I}(\ell) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{ch}\underline{\gamma}\ell & -\underline{Zc}\mathrm{sh}\underline{\gamma}\ell \\ -\frac{1}{\underline{Zc}}.\mathrm{sh}\underline{\gamma}\ell & \mathrm{ch}\underline{\gamma}\ell \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \underline{V}(0) \\ \underline{I}(0) \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

Invertendo a matriz presente na relação matricial anterior obtém-se (3.34).

$$\begin{bmatrix} \underline{V}(0) \\ \underline{I}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{ch}\underline{\gamma}\ell & \underline{Zc}\mathrm{sh}\underline{\gamma}\ell \\ \frac{1}{\underline{Zc}}.\mathrm{sh}\underline{\gamma}\ell & \mathrm{ch}\underline{\gamma}\ell \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \underline{V}(\ell) \\ \underline{I}(\ell) \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

As matrizes presentes nas relações matriciais (3.33) e 3.34) apresentam diversas semelhanças:

- Ambas relacionam duas grandezas de entrada ($\underline{V}(0)$ e $\underline{I}(0)$) com duas grandezas de saída ($\underline{V}(\ell)$ e $\underline{I}(\ell)$) formando um quadripólo;

- A não existência de fontes no seu interior implica que, não existindo tensão e intensidade de corrente num extremo, no outro extremo também não existam. Por esta razão, pode-se afirmar que o quadripólo é passivo;

- A aplicação de tensão e intensidade de corrente alternadamente num dos dois extremos permite obter resultados idênticos, ou seja, o comportamento da linha é igual, independentemente do extremo usado. Existe, então, simetria do quadripólo.

Conclui-se ser possível a utilização de quadripólos equivalentes para a representação de linhas de transmissão de energia verificando as relações (3.33) e (3.34).

O esquema equivalente em Π é o quadripólo mais utilizado para representar linhas ou cabos de transmissão de energia. A figura 3.3 apresenta o esquema equivalente em Π.

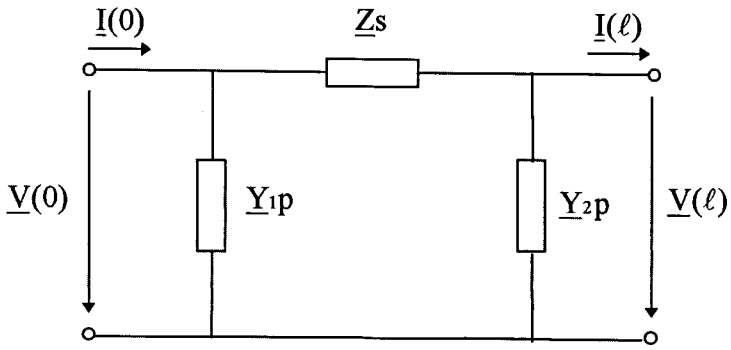


Figura 3.3 - Esquema equivalente em Π

As equações que determinam o funcionamento do esquema equivalente em Π apresentado na figura 3.7, são as seguintes:

$$\underline{V}(\ell) = \underline{V}(0) - \underline{Z}s\left[\underline{I}(0) - \underline{Y}1p.\underline{V}(0)\right] \tag{3.35}$$

$$\underline{I}(\ell) = \underline{I}(0) - \underline{Y}1p.\underline{V}(0) - \underline{Y}2p.\underline{V}(\ell) \tag{3.36}$$

Resolvendo as equações anteriores em ordem a $\underline{V}(\ell)$ e $\underline{I}(\ell)$ obtêm-se as equações:

$$\underline{V}(\ell) = \left(1 + \underline{Z}s.\underline{Y}1p\right).\underline{V}(0) - \underline{Z}c.\underline{I}(0) \tag{3.37}$$

$$\underline{I}(\ell) = \left(1 + \underline{Z}s.\underline{Y}2p\right).\underline{I}(0) - \left(\underline{Y}1p + \underline{Y}2p + \underline{Z}s.\underline{Y}1p.\underline{Y}2p\right).\underline{V}(0) \tag{3.38}$$

Comparando as equações (3.37) e (3.38) com as equações associadas à relação matricial (3.33), chega-se às expressões (3.39) e (3.40) para os parâmetros concentrados que constam do esquema equivalente em Π.

$$\underline{Z}s = \underline{Z}c.\mathrm{sh}\underline{\gamma}\ell \tag{3.39}$$

$$\underline{Y}1p = \underline{Y}2p = \frac{1}{\underline{Z}c}.\frac{\mathrm{ch}\,\underline{\gamma}\ell - 1}{\mathrm{sh}\underline{\gamma}x} = \frac{1}{\underline{Z}c}.\mathrm{th}\left(\frac{\underline{\gamma}\ell}{2}\right) \tag{3.40}$$

Atribuindo o valor zero a R e G, para a linha ideal, os parâmetros do esquema em Π ficam:

$$\underline{Z}s = j\sqrt{\frac{L}{C}}\sin\beta\ell \tag{3.41}$$

$$\underline{Y}_1p = \underline{Y}_2p = j\sqrt{\frac{C}{L}}tg\frac{\beta\ell}{2} \tag{3.42}$$

Dado que o período espacial λ das ondas de tensão e de intensidade de corrente é dado pela expressão:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \tag{3.43}$$

as equações (3.41) e (3.42) podem ser reescritas obtendo-se:

$$\underline{Z}s = j\sqrt{\frac{L}{C}}\sin\left(\frac{\ell}{\lambda}.2\pi\right) \tag{3.44}$$

$$\underline{Y}_1p = \underline{Y}_2p = j\sqrt{\frac{C}{L}}tg\left(\frac{\ell}{\lambda}.\pi\right) \tag{3.45}$$

O tipo de impedância e admitâncias, dependem do comprimento da linha. Se o comprimento da linha for inferior a meio comprimento de onda, a impedância $\underline{Z}s$ é puramente indutiva e as admitâncias $\underline{Y}_1p$ e $\underline{Y}_2p$ são puramente capacitivas. Se o comprimento referido estiver compreendido entre meio e um comprimento de onda, $\underline{Z}s$ é puramente capacitivo $\underline{Y}_1p$ e $\underline{Y}_2p$ são puramente Indutivos.

Se a linha for curta, ou seja, $|\underline{\theta}| = |\underline{\gamma}|.\ell \leq 0{,}1$ obtêm-se:

$$\text{ch}\,\underline{\gamma}\ell \cong 1 + \frac{\theta^2}{2} \tag{3.46}$$

$$\text{sh}\underline{\gamma}\ell \cong \underline{\gamma}\ell \tag{3.47}$$

Substituindo (3.46) e (3.47) nas expressões (3.39) e (3.40) dos parâmetros concentrados que constam do esquema equivalente em Π, a primeira ficará:

$$\underline{Z}s = \underline{Z}c.\underline{\gamma}\ell \tag{3.48}$$

$$\underline{Z}s = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \cdot \sqrt{(R + j\omega L).(G + j\omega C)}.\ell \tag{3.49}$$

$$\underline{Z}s = (R + j\omega L).\ell \tag{3.50}$$

e a segunda ficará:

$$\underline{Y}_1p = \underline{Y}_2p = \frac{1}{\underline{Z}c} \cdot \frac{1 + \frac{\underline{\theta}^2}{2} - 1}{\underline{\theta}} = \frac{1}{\underline{Z}c} \cdot \frac{\underline{\theta}}{2} \tag{3.51}$$

$$\underline{Y}_1p = \underline{Y}_2p = \sqrt{\frac{G + j\omega C}{R + j\omega L}} \cdot \sqrt{(R + j\omega L).(G + j\omega C)}.\frac{\ell}{2} \tag{3.52}$$

$$\underline{Y}_1p = \underline{Y}_2p = (G + j\omega C).\frac{\ell}{2} \tag{3.53}$$

As expressões (3.50) e (3.53), parâmetros do esquema equivalente em Π, são válidas para linhas curtas. Nesta situação foi desprezado o efeito de distribuição de parâmetros e realizadas simplificações nas funções hiperbólicas.

3.3.2 - Modelo utilizado pelo EMTP

As linhas utilizando o esquema equivalente PI são modelizadas segundo o esquema da figura 3.4. Sendo a admitância puramente capacitiva, este modelo é valido para linhas curtas. As suas características são introduzidas em três matrizes [R], [L] e [C] com os elementos próprios de cada fase na diagonal e entre fases ou fase terra fora da diagonal. São necessárias três matrizes que são assumidas como simétricas, especificando-se só os valores da diagonal e abaixo desta.

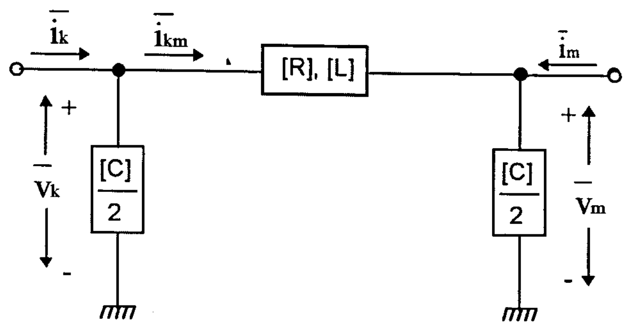


Figura 3.4 - Esquema equivalente em Π utilizado no programa EMTP

3.3.3 - Formato dos dados

O ficheiro de dados referentes a linhas adoptando o esquema equivalente em Π inicia-se por uma primeira linha tal como representado na tabela 3.4.

```
         1         2         3         4         5         6         7         8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
  USE RL
```

Tabela 3.4 - Formato dos dados da primeira linha de uma linha em equivalente Π

Seguem-se os dados da linha representados na tabela 3.5:

```
         1         2         3         4         5         6         7         8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

ITY PE	node name		reference br.		elements (k, m)			elements (k, m+1)			elements (k, m+2)		
	BUS 1	BUS 2	BUS 3	BUS 4	R	L	C	R	L	C	R	L	C
I2	A6	A6	A6	A6	E16.0	E16.0	E16.0	E16.0	E16.0	E16.0	E16.0	E16.0	E16.0

Tabela 3.5 - Formato dos dados de uma linha adoptando o esquema equivalente Π

Os parâmetros são:

ITYPE: Número de 1 a 40 para definir a fase a que correspondem os dados;

BUS1, BUS2: Nome dos nós (extremos da linha) com o máximo de 6 caracteres. Se um dos nós estiver ligado à terra, o nome desse nó fica em branco;

BUS3, BUS4: Nome dos nós extremos do ramo que, por ter características iguais aos restantes, se pode tomar por ramo de referência;

R: resistência em ohm;

L: Indutância, expressa em mH se XOPT=0. Se XOPT=f neste campo deverá ser colocado o valor da reactância em óhm (ver 2.2);

C: Capacidade, expressa em μF se COPT=0. Se COPT=f neste campo deverá ser colocado o valor da susceptância em μS (ver 2.2);

Como exemplo, na tabela 3.6, são indicados as posições dos dados referentes a uma linha trifásica possuindo dois condutores por fase e representada pelo esquema equivalente em Π .

1	N1-FASE A	N2-FASE A			R11	L11	C11						
2	N1-FASE B	N2-FASE B			R21	L21	C21	R22	L22	C21			
3	N1-FASE C	N2-FASE C			R31	L31	C31	R32	L32	C32	R33	L33	C33
4	N1-FASE D	N2-FASE D			R41	L41	C41	R42	L42	C42	R43	L43	C43
					R44	L44	C44						
5	N1-FASE E	N2-FASE E			R51	L51	C51	R52	L52	C52	R53	L53	C53
					R54	L54	C54	R55	L55	C55			
6	N1-FASE F	N2-FASE F			R61	L61	C61	R62	L62	C62	R63	L63	C63
					R64	L64	C64	R65	L65	C65	R66	L66	C66

Tabela 3.6 - Formato dos dados de uma linha adoptando o esquema equivalente Π

3.4 - Exemplo 1

3.4.1 - Dados da simulação

O exemplo seguinte, simula um curto-circuito no extremo de uma linha de 420 kV (tensão composta), ligada a um nó da rede com uma potência de curto-circuito de 20 GVA [4]. Na figura 3.5, é apresentado o esquema da rede e da linha onde se irá simular o curto-circuito fase-terra através do fecho de um interruptor existente entre o nó 4 e a terra ao fim de um período de tempo pré-definido.

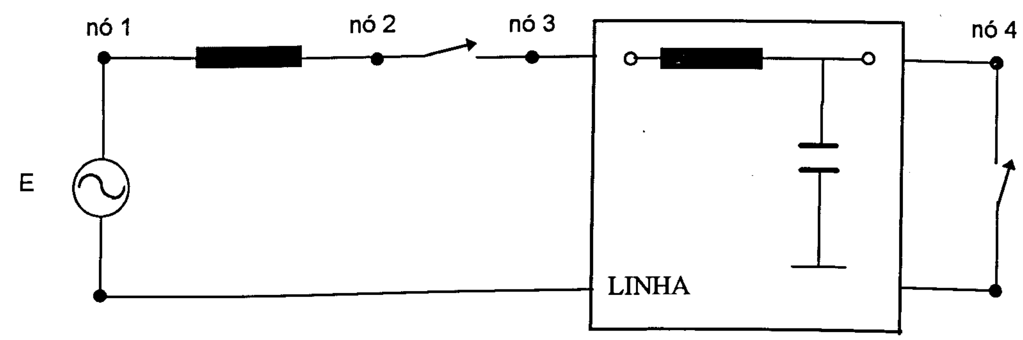


Figura 3.5 - Esquema da rede e da linha onde se vai simular um curto-circuito

Na listagem 3.1 apresenta-se o ficheiro de dados correspondente à situação descrita. Este ficheiro é constituído pelos seguintes blocos:

A - Início do programa com a linha "BEGIN NEW DATA CASE", (linha 3);

B - Definição de parâmetros gerais (linhas 4 e 5);

C - Definição de dados gerais reais (linha 10);

D - Definição de dados gerais inteiros (linhas 15);

E - Definição de dados dos ramos:

. Impedância da fonte (linhas 22 a 24);

. linha representada pelo esquema em Π sem acoplamentos;

de parâmetros distribuídos (linhas 29 a 31);

finalizando com um BLANK CARD;

F - Definição de dados dos interruptores:

. Interruptor principal (linhas 40 a 42);

. Interruptor que cria o defeito (linha 46);

finalizando com um BLANK CARD;

G - Definição dos dados da fonte (linhas 53 a 55), finalizando com um BLANK CARD;

E - Definição das variáveis de saída (linha 61), finalizando com um BLANK CARD;

I - Definição da saída para plotter (não definido), finalizando com um BLANK CARD;

J - BLANK CARD a finalizar o ficheiro de dados de entrada.

Como mostra a listagem 3.1, o ficheiro de entrada é um ficheiro de texto com 80 caracteres por linha. As linhas de comentário, iniciam-se com a letra "C", colocado na primeira coluna. A colocação dos dados tem que cumprir a formatação e localização dos campos.

No bloco B temos:

- o parâmetro geral "$CLOSE" (linha 3), permite desligar um possível ficheiro que ainda estivesse ligado aos canais de entrada/saída de dados de uma simulação anterior. O *status* ao ser igualado a *delete* permite limpar estes canais;

```
Ln                                                  PROGRAMA
 1 C         1         2         3         4         5         6         7         8
 2 C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 3 BEGIN NEW DATA CASE
 4 $CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
 5 $OPEN, UNIT=4 FILE=EXEMPLO1.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN RECL=8000
 6 C Ficheiro - exemplo1.dat
 7 C Definição de dados gerais reais
 8 C
 9 C DELTAT     TMAX     XOPT     COPT   EPSILN   TOLMAT   TSTART
10   50.E-6 100.E-3    0.E+0    0.E+0      0.0      0.0      0.0
11 C
12 C Definição de dados gerais inteiros
13 C
14 C    IOUT    IPLOT   IDOUBL   KSSOUT   MAXOUT     IPUN   MEMSAV     ICAT   NENERG   IPRSUP
15       20        1        1        1        1        0        0        1        0        0
16 C
17 C Definição de dados dos ramos
18 C
19 C Impedancia da fonte
20 C
21 C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R      L      C
22   NO1A   NO2A                   0.028.089    0.0                                        0
23   NO1B   NO2B   NO1A   NO2A                                                              0
24   NO1C   NO2C   NO1A   NO2A                                                              0
25 C
26 C Linha em equivalente PI (sem acoplamentos)
27 C
28 C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R      L      C      R      L      C      R      L      C
29   USE RL
30  1NO3A   NO4A                  1.41 8.334   .164
31  2NO3B   NO4B                                      1.41 8.334   .164
32  3NO3C   NO4C                                                      1.41 8.334   .164
33 BLANK CARD finalizando dados dos ramos
34 C
35 C Definição dos dados dos interruptores
36 C
37 C Interruptor principal
38 C
39 C BUS1   BUS2       TCLOSE      TOPEN         IE
40   NO2A   NO3A         -1.0        1.1        0.0                                        1
41   NO2B   NO3B         -1.0        1.1        0.0                                        1
42   NO2C   NO3C         -1.0        1.1        0.0                                        1
43 C
44 C Interruptor que cria o curto-circuito
45 C
46 C BUS1   BUS2       TCLOSE      TOPEN         IE
47   NO4A             40.E-3        1.0        0.0                                        1
48 BLANK CARD finalizando dados dos interruptores
49 C
50 C Definição dos dados das fontes
51 C
52 C NAME      AMPLITUDE FREQUENCY      PHASE         A1                TSTART      TSTOP
53 14NO1A       342929.0      50.0        0.0                             -1.0
54 14NO1B       342929.0      50.0     -120.0                             -1.0
55 14NO1C       342929.0      50.0     -240.0                             -1.0
```

Listagem 3.1 - Ficheiro (exemplo1.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito fase-terra numa extremidade de uma linha representada pelo esquema em Π sem acoplamentos

```
56 BLANK CARD finalizando dados das fontes
57 C
58 C Definição das vari veis de saída (tensÆo dos nós)
59 C
60 C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4   BUS5   BUS6
61   NO3A   NO3B   NO3C   NO4A   NO4B   NO4C
62 BLANK CARD finalizando defini‡Æo das vari veis de saída
63 C
64 C Definição das saídas para plotter
65 C
66 BLANK CARD finalizando defini‡Æo das saídas para plotter
67 $CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
68 BLANK CARD finalizando programa de simula‡Æo
```

Listagem 3.1 - Ficheiro (exemplo1.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito fase-terra numa extremidade de uma linha representada pelo esquema em Π sem acoplamentos (continuação)

- o parâmetro geral "$OPEN", (linha 4) permite ligar o ficheiro "exemplo1.pl4" ao canal de saída, e ainda definir o tipo de ficheiro.

No blocos C e D são definidos os parâmetros gerais reais e inteiros (ver 2.4.2).

No bloco E (definição de dados dos ramos) figuram:

- A impedância da fonte (linhas 22 a 24), é calculada a partir da potência de curto-circuito no ponto de ligação da linha (20 GVA). A indutância equivalente da rede será:

$$L = \frac{1}{314} \cdot \frac{420^2}{20000} = 28.089\text{mH}$$

A formatação dos dados é apresentada na tabela 3.7.

	node name		reference br.					
	BUS 1	BUS 2	BUS 3	BUS 4	R	L	C	
	A6	A6	A6	A6	E16.0	E16.0	E16.0	

Tabela 3.7 - Formatação dos dados da impedância da fonte

Como a indutância nas três fases é igual, este valor é introduzido só na primeira linha (linha 22 da listagem 3.1 e correspondendo ao ramo no1A-no2A). O primeiro ramo é utilizado como ramo de referência (*reference branche* da tabela 3.7), não sendo, por esta razão, necessário preencher os campos correspondentes às outras fases com o valor da indutância.

- Os dados da linha de parâmetros distribuídos (linhas 29 a 32), tem o formato apresentado nas tabelas 3.4 e 3.5. As características da linha são:

  . R = 0,028 Ω;

  . L = 0,089 mH;

  . C = 0.0 μ F.

O bloco F (definição de dados dos interruptores), é constituído por:

- Interruptor principal colocado entre os nós 2 e 3 da rede em estudo, linhas 39 a 41, cuja formatação dos dados é mostrada na tabela 3.8. O interruptor fecha antes de se iniciar a simulação (tclose = -0,1 s) e abre passados 1,1 s (topen = 1,1), já após ter terminado a simulação.

	node name		Time Criteria				Output option
	BUS 1	BUS 2	Tclose	Topen	IE		
	A6	A6	E10	E10	E10		I1

Tabela 3.8 - Formatação dos dados de um interruptor

Os parâmetros incluídos nesta tabela são:

BUS1, BUS2: Nome dos nós onde está ligado o interruptor. Para ligar o interruptor à terra basta não colocar o nome do respectivo nó;

TCLOSE: Instante em que ocorre o fecho do interruptor;

TOPEN: Instante em que ocorre a abertura do interruptor;

IE: Definição do valor da intensidade de corrente para a abertura do interruptor. Com IE=0 o pólo abre quando a intensidade de corrente for nula. Com IE>0 o pólo abre dentro do intervalo definido pelo valor IE;

OUTPUT OPTION: Neste campo são definidas as variáveis de saída:

1 - intensidade de corrente no interruptor;

2 - tensão no interruptor;

3 - intensidade de corrente e tensões no interruptor;

4 - potência e energia máxima veiculada pelo interruptor;

- Interruptor que cria o defeito (linha 46). A formatação dos dados é apresentada na tabela 3.8. O interruptor fecha durante a simulação (tclose = 40 ms) e abre depois da simulação acabar (topen = 1 s), estando o nó associado a BUS2 ligado à terra (sem nome).

No Bloco G (definição dos dados da fonte, linhas 52 a 54), é parametrizada a fonte. A sua formatação é mostrada na tabela 3.9.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40	41 42 43 44 45 46 47 48 49 50	51 52 53 54 55 56 57 58 59 60	61 62 63 64 65 66 67 68 69 70	71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
1 4 NAME	ST	AMPLITUDE	FREQUENCY	PHASE	A1		TSTART	TSTOP
	A6	I2	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6		E10.6	E10.6

Tabela 3.9 - Formatação dos dados de uma fonte de energia eléctrica

Nesta tabela incluem-se os dados seguintes:

NAME: Nome do nó a que se encontra ligada a fonte;

ST: Campo que selecciona a fonte como sendo de tensão ou de corrente e sendo:

- vazio ou "0", fonte de tensão;

- "-1", fonte de corrente;

AMPLITUDE: O valor de pico da tensão;

FREQUENCY: Frequência em Hertz.

PHASE: Fase da tensão, em que as unidades estão dependentes do campo A1.

A1: Parâmetro que define as unidades do campo *phase* que poderá ser:

- "0", fase em graus. A expressão da função será:

$$f(t) = AMPLITUDE.COS(2\pi.FREQUENCY.t + PHASE)$$

- ">0", fase em segundos. A expressão da função será:

$$f(t) = AMPLITUDE.COS\{2\pi.FREQUENCY.(t + PHASE)\}$$

TSART: Instante em que a fonte é activada;

TOPEN: Instante em que a fonte é desactivada.

Dados para o exemplo1:

- A amplitude $E = \frac{420}{\sqrt{3}} . \sqrt{2} = 342{,}93$ kV (valor de pico da tensão simples);

- A frequência igual a 50 Hz;

- As fases:

  . fase A - a fase da tensão é "0";

  . fase B - a fase da tensão é "-120";

  . fase C - a fase da tensão é "-240".

No Bloco E (definição das variáveis de saída, linha 60), são definidas as variáveis de saída. A formatação dos dados é apresentada na tabela 3.10.

NAMES OF NODES HAVING VOLTAGE OUTPUT												
BUS1	BUS2	BUS3	BUS4	BUS5	BUS6	BUS7	BUS8	BUS9	BUS10	BUS11	BUS12	BUS13
A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6

Tabela 3.10 - Formatação dos dados das variáveis de saída

Como mostra a tabela 3.10, é possível definir até treze tensões como variáveis de saída.

3.4.2 - Resultados da simulação

Os resultados da simulação são colocados num ficheiro de saída (exemplo1.lis), que é apresentado na listagem 3.2 (anexo A). É um ficheiro de texto com 130 caracteres por linha e que se pode caracterizar da seguinte forma:

- Nas primeiras duas folhas da listagem 3.2 (p1 e p2), constituídas por duas colunas, é realizada uma análise aos dados de entrada. Na coluna da esquerda com o título *"Descriptive interpretation of input data cards"*, é realizada uma análise aos dados de entrada, que estão colocados na coluna da direita. A verificação desta parte da listagem

é importante e essencial nos casos em que a simulação aborta, por forma a ser possível determinar a causa de tal facto;

- Nas folhas p2 e p3, encontram-se impressos os resultados do fluxo de potências realizado para a rede em estudo, tensões nos nós e intensidades de correntes nos ramos nas formas rectangular e polar, potências activas e reactivas veiculadas pelos ramos da rede;

- Na folha p4, antes de se iniciar a simulação, é fechado o interruptor entre o nós 2 e 3;

- Em seguida é realizada a impressão dos resultados seleccionados com intervalos de tempo de 1 ms e em que se pode referir como factos importantes o fecho do interruptor que provoca o defeito no instante Time = 0,4 ms, provocando a anulação da tensão do nó 4A (folha p4);

- Os valores máximos e mínimos das variáveis seleccionadas, são impressas na folha p5 e p6;

- A listagem acaba com uma análise dos tempos gastos na simulação.

É necessário converter os dados da simulação (em formato texto com 130 caracteres por linha), para formatação adequada, de modo a ser possível realizar o seu tratamento. No presente caso, o ficheiro exemplo1.lis foi convertido em campos, utilizando a opção "Dados - Texto para colunas " do Excel.

Na figura 3.6, é apresentado o andamento das tensões nos nós 3A, 3B e 3C, podendo-se identificar duas situações distintas. A primeira situação corresponde às ondas das fases sem defeito (B e C), que são sempre sinusoidais perfeitas. Uma segunda situação corresponde à onda da fase A, com defeito, que no primeiro período (antes do defeito e até T =40 ms) corresponde a uma sinusoide pura e um segundo período (pós-defeito) apresenta distorções.

A figura 3.7, mostra o andamento das tensões nos nós 4A, 4B e 4C, podendo-se à semelhança da figura 3.6, caracterizar duas situações diferentes. A primeira situação corresponde às ondas das fases sem defeito (B e C), que são sempre perfeitas. Uma segunda situação corresponde à onda da fase A, com defeito, que no primeiro período (antes do defeito e até T =40 ms) correspondente a uma sinusoide perfeita. No segundo período (pós-defeito) a tensão na fase A é nula devido ao defeito simulado.

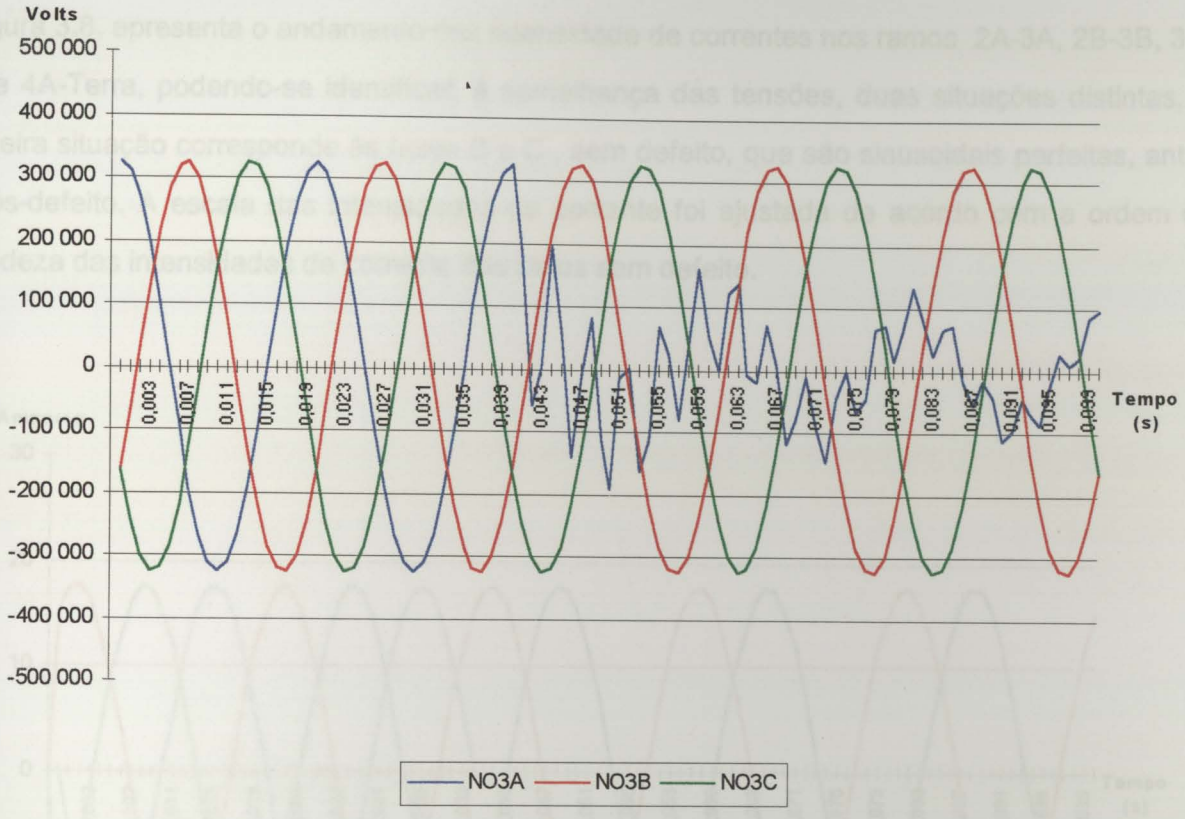


Figura 3.6 - Tensões nos nós 3A, 3B e 3C antes e pós-defeito (curto-circuito monofásico) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π sem acoplamentos

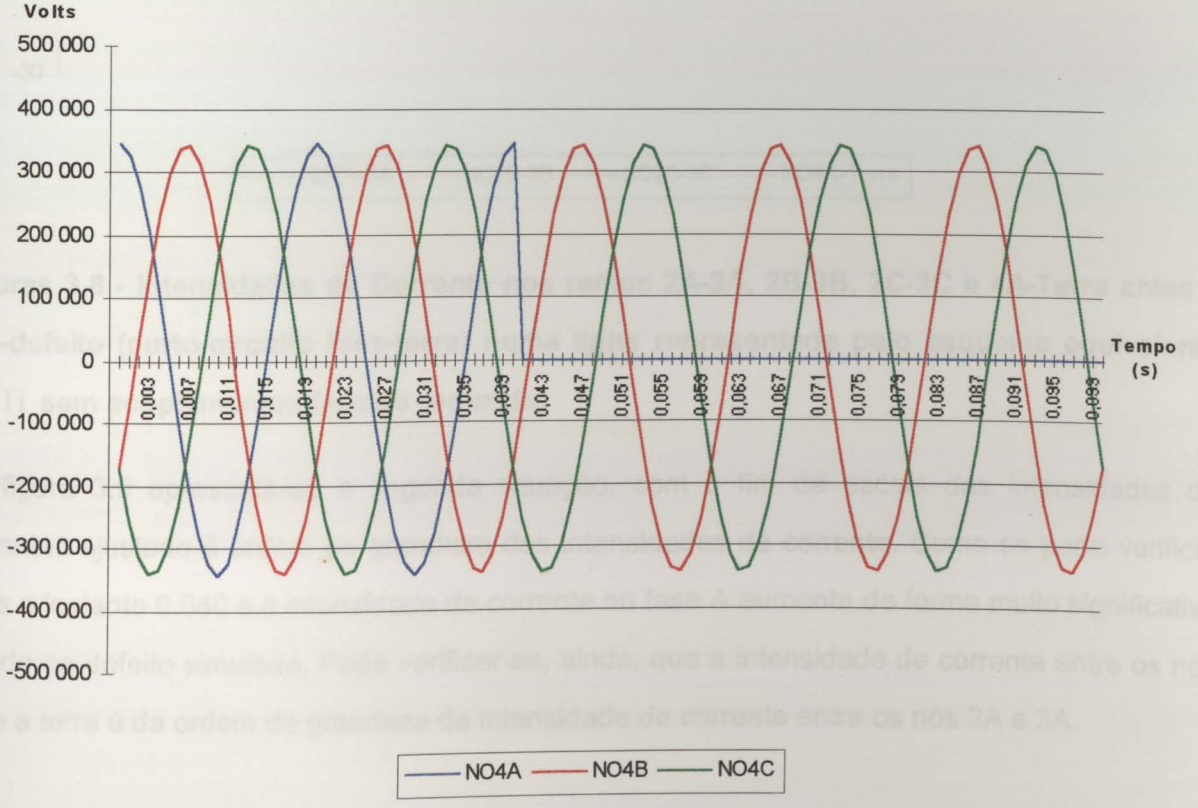
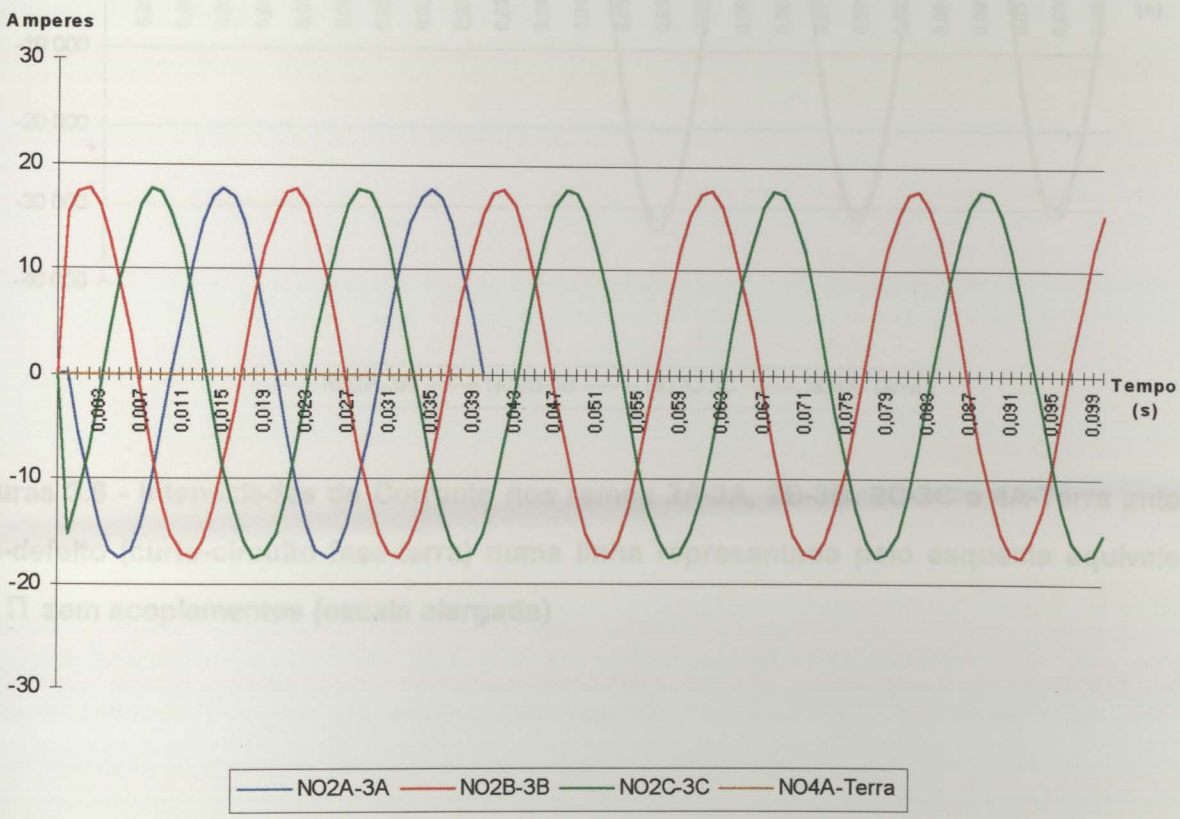


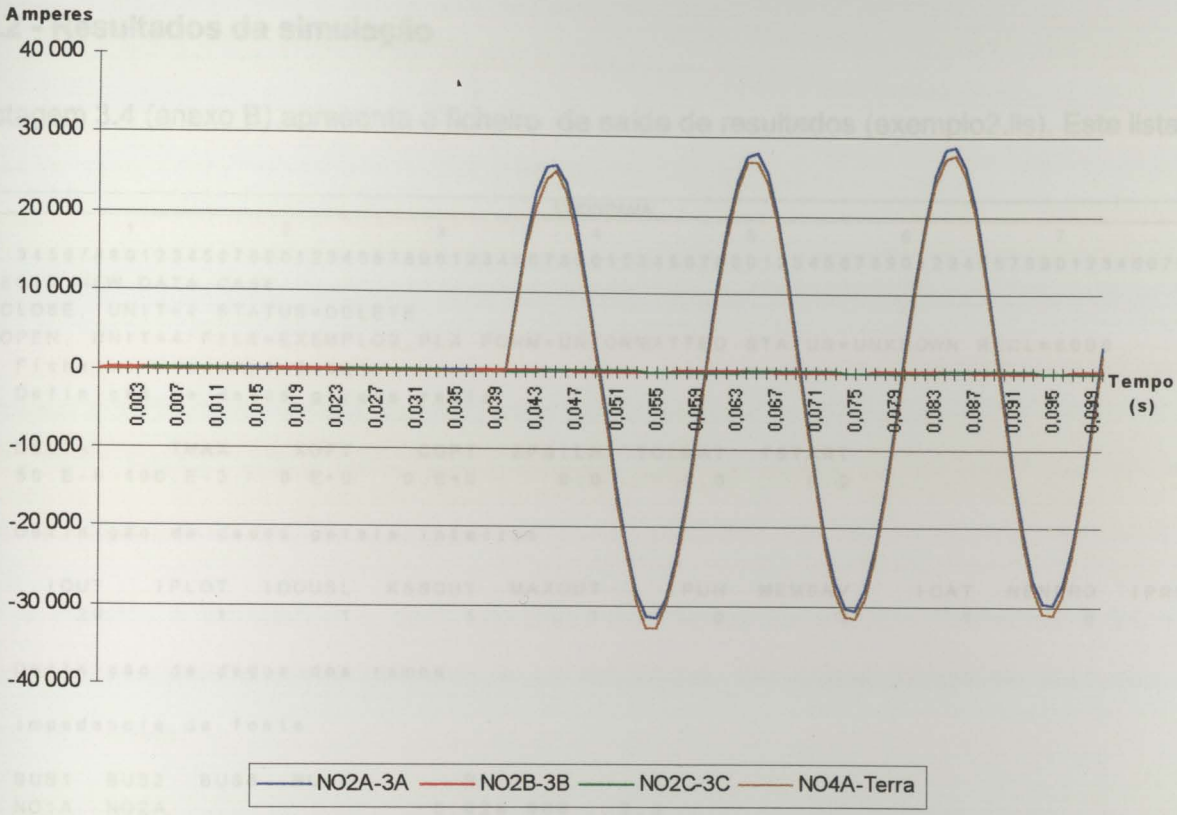
Figura 3.7- Tensões nos nós 4A, 4B e 4C antes e pós-defeito (curto-circuito monofásico) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π sem acoplamentos

A figura 3.8, apresenta o andamento das intensidade de correntes nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 3C-3C e 4A-Terra, podendo-se identificar, à semelhança das tensões, duas situações distintas. A primeira situação corresponde às fases B e C , sem defeito, que são sinusoidais perfeitas, antes e pós-defeito. A escala das intensidades de corrente foi ajustada de acordo com a ordem de grandeza das intensidades de corrente das fases sem defeito.



Figuras 3.8 - Intensidades de Corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 2C-3C e 4A-Terra antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π sem acoplamentos (escala reduzida)

Na figura 3.9 apresenta-se a segunda situação, com o fim de escala das intensidades de correntes ajustado à ordem de grandeza das intensidades de corrente. Como se pode verificar após o instante 0,040 s a intensidade de corrente na fase A aumenta de forma muito significativa devido ao defeito simulado. Pode verificar-se, ainda, que a intensidade de corrente entre os nós 4A e a terra é da ordem de grandeza da intensidade de corrente entre os nós 2A e 3A.



Figuras 3.9 - Intensidades de Corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 2C-3C e 4A-Terra antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π sem acoplamentos (escala alargada)

3.5 - Exemplo 2

3.5.1 - Dados da simulação

O exemplo 2 é idêntico ao exemplo 1, com excepção dos dados da linha de transmissão de energia, que neste exemplo tem acoplamentos entre fases. Mantêm-se o modelo utilizado, o esquema equivalente em Π. De notar a alteração dos dados da linha de transmissão de energia, linhas 30 a 32, existindo agora, valores abaixo da diagonal referentes aos acoplamentos entre fases. O ficheiro de dados é apresentado na listagem 3.3.

3.5.2 - Resultados da simulação

A listagem 3.4 (anexo B) apresenta o ficheiro de saída de resultados (exemplo2.lis). Esta lista-

```
Ln                                                  PROGRAMA
C          1          2          3          4          5          6          7          8
C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
$OPEN, UNIT=4 FILE=EXEMPLO2.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN RECL=8000
C Ficheiro - exemplo2.dat
C Definição de dados gerais reais
C
C DELTAT     TMAX     XOPT     COPT   EPSILN   TOLMAT   TSTART
  50.E-6 100.E-3    0.E+0    0.E+0      0.0      0.0      0.0
C
C Definição de dados gerais inteiros
C
C    IOUT    IPLOT   IDOUBL   KSSOUT   MAXOUT     IPUN   MEMSAV     ICAT   NENERG   IPRSUP
       20        1        1        1        1        0        0        1        0        0
C
C Definição de dados dos ramos
C
C Impedancia da fonte
C
C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R      L      C
  NO1A   NO2A                   0.028.089    0.0                                        0
  NO1B   NO2B   NO1A   NO2A                                                              0
  NO1C   NO2C   NO1A   NO2A                                                              0
C
C Linha em equivalente PI (com acoplamentos)
C
C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R      L      C      R      L      C      R      L      C
  USE RL
 1NO3A   NO4A                  1.41 8.334   .164
 2NO3B   NO4B                  0.972.8586-.0289  1.239.1392 .1626
 3NO3C   NO4C                  0.912.2823-.0088  0.863.4218-.0273  1.16 9.518 .1662
BLANK CARD finalizando dados dos ramos
C
C Definição dos dados dos interruptores
C
C Interruptor principal
C
C BUS1   BUS2       TCLOSE      TOPEN         IE
  NO2A   NO3A         -1.0     80.E-3        0.0                                        1
  NO2B   NO3B         -1.0     80.E-3        0.0                                        1
  NO2C   NO3C         -1.0     80.E-3        0.0                                        1
C
C Interruptor que cria o curto-circuito
C
C BUS1   BUS2       TCLOSE      TOPEN         IE
  NO4A              40.E-3        1.0        0.0                                        1
BLANK CARD finalizando dados dos interruptores
C
C Definição dos dados das fontes
C
C NAME      AMPLITUDE FREQUENCY      PHASE         A1                TSTART      TSTOP
14NO1A       342929.0      50.0        0.0                            -1.0
14NO1B       342929.0      50.0     -120.0                            -1.0
14NO1C       342929.0      50.0     -240.0                            -1.0
```

Listagem 3.3 - Ficheiro (exemplo2.dat) com os dados de entrada referentes à simulação de um curto circuito numa linha representada pelo esquema equivalente em Π com acoplamentos

```
56 BLANK CARD finalizando dados das fontes
57 C
58 C Definição das vari veis de saida (tensão dos nos)
59 C
60 C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4   BUS5   BUS6
61   NO3A   NO3B   NO3C   NO4A   NO4B   NO4C
62 BLANK CARD finalizando definição das vari veis de saida
63 C
64 C Definição das saidas para plotter
65 C
66 BLANK CARD finalizando definição das saidas para plotter
67 $CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
68 BLANK CARD finalizando programa de simulação
```

Listagem 3.3 - Ficheiro (exemplo2.dat) com os dados de entrada referentes à simulação de um curto circuito numa linha representada pelo esquema equivalente em Π com acoplamentos (continuação).

gem é idêntica à listagem 3.2, com excepção dos dados de entrada referentes à linha de transmissão, já anteriormente referidos, e os resultados, em consequência da alteração dos dados de entrada.

Na figura 3.10, é apresentado o andamento das tensões nos nós 3A, 3B e 3C, podendo-se identificar um primeiro período (antes do defeito e até T =40 ms) com as ondas de tensão representadas por sinusóides perfeitas e um segundo período (pós-defeito) com as ondas distorcidas. A partir da abertura do interruptor ,Time = 80 ms, (ver página p5, da listagem 3.4 do anexo B), as ondas das tensões B e C, devido aos acoplamentos, passaram a assumir valores negativos.

Na figura 3.11, apresenta-se o comportamento das tensões nos nós 4A, 4B e 4C, podendo-se identificar um primeiro período (antes do defeito e até T =40 ms) com as ondas correspondentes a sinusoides perfeitas até a tensão do nó 4A se anular, com a introdução do defeito. Um segundo período (pós-defeito), com as ondas de tensão das fases B e C sãs sofrendo distorções significativas. A partir da abertura do interruptor ,Time = 80 ms, (ver página p5, da listagem 3.4 do anexo B), as ondas das tensões B e C apresentam-se distorcidas devido aos acoplamentos entre fases.

Na figura 3.12 apresenta-se o andamento das intensidades de corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 3C-3C e 4A-Terra, com escala escolhida de acordo com a ordem de grandeza das intensidades de corrente das fases B e C, sem defeito. É possível identificar um primeiro período (antes do defeito e até Time = 40 ms) com as ondas perfeitas, sendo nula a intensidade de corrente fase A-terra. No segundo período, pós-defeito, as mesmas ondas apresentam-se bastante distorcidas, anulando-se na parte final uma a uma, com a abertura, pólo a pólo

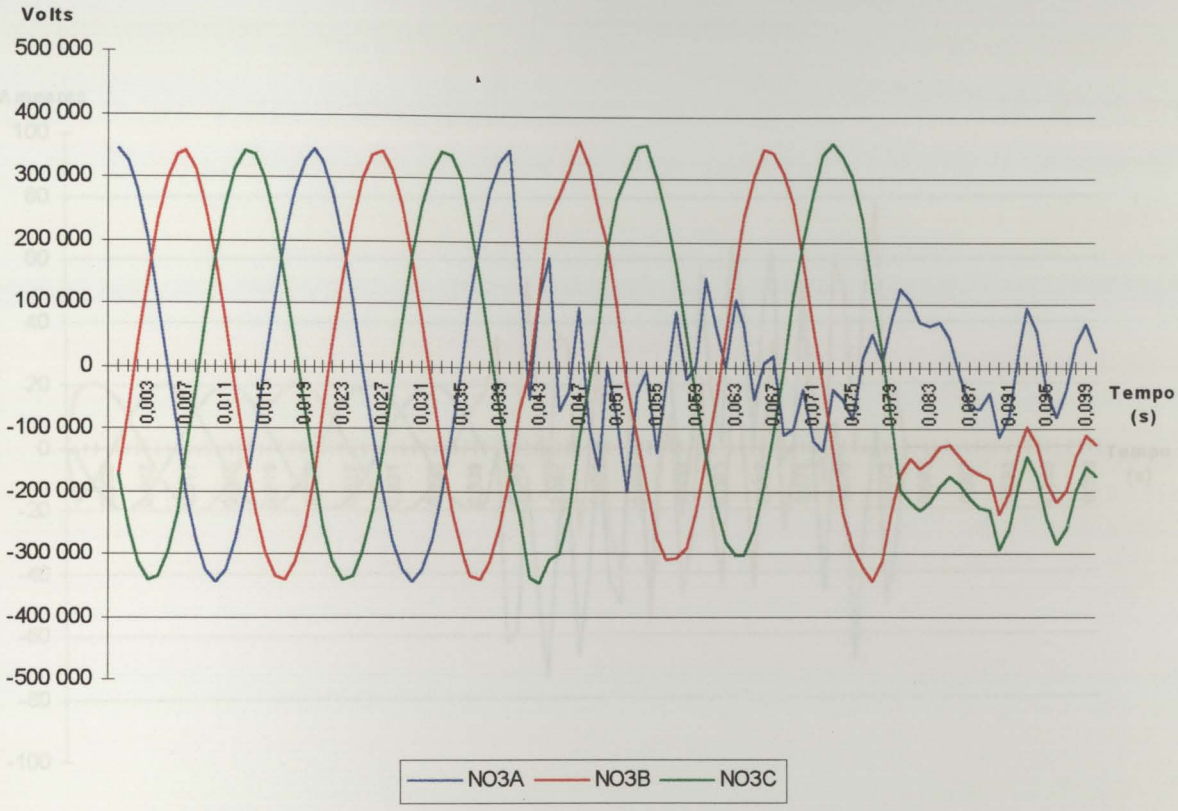


Figura 3.10 - Tensões nos nós 3A, 3B e 3C antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π com acoplamentos entre fases

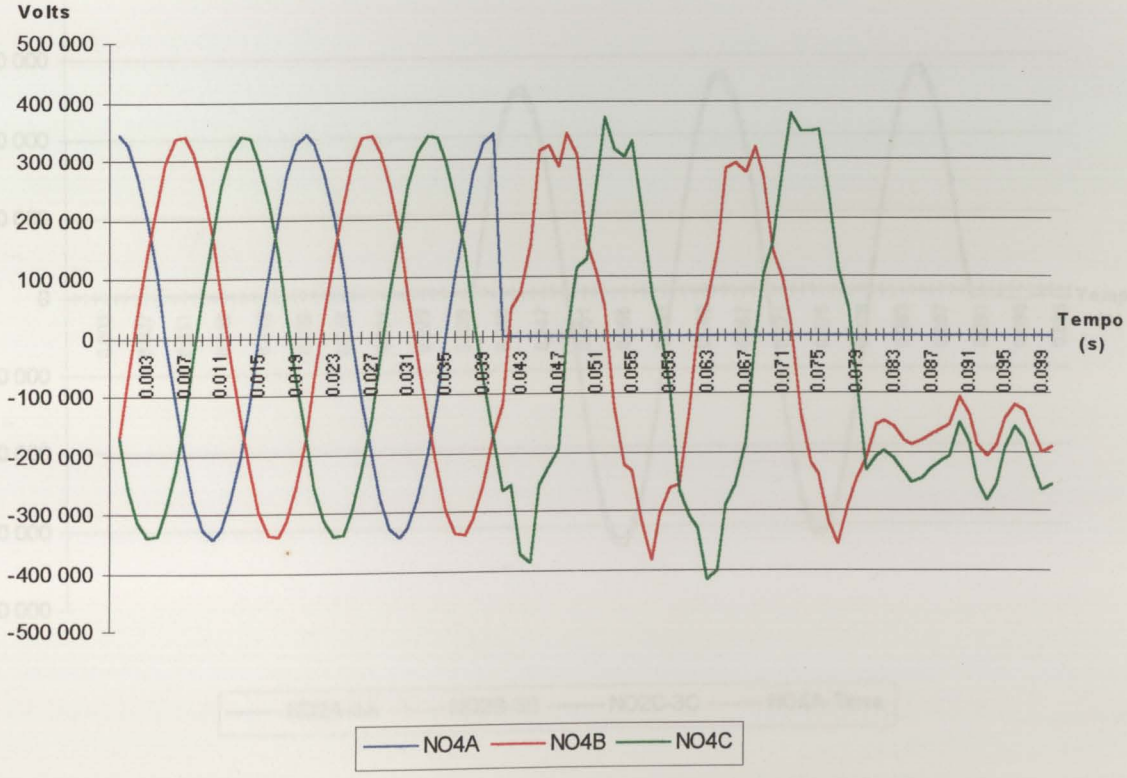
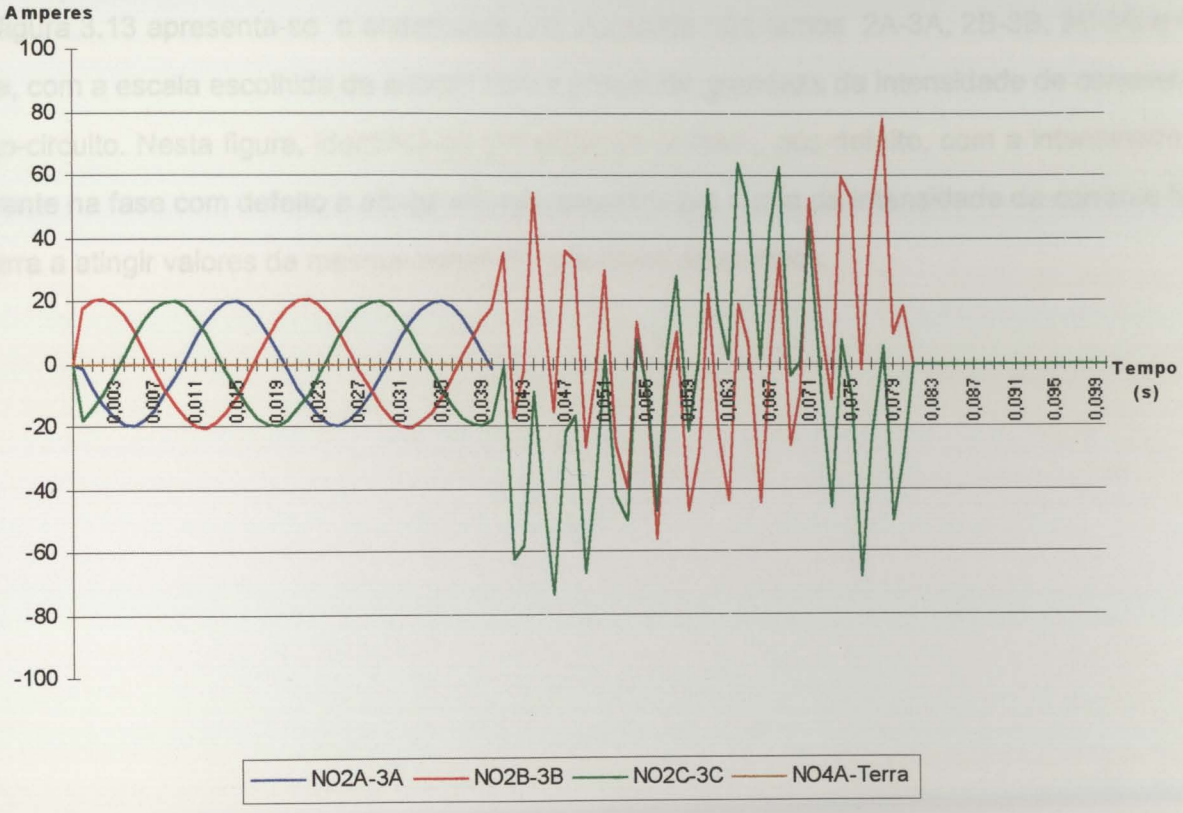


Figura 3.11 - Tensões nos nós 4A, 4B e 4C antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π com acoplamentos entre fases



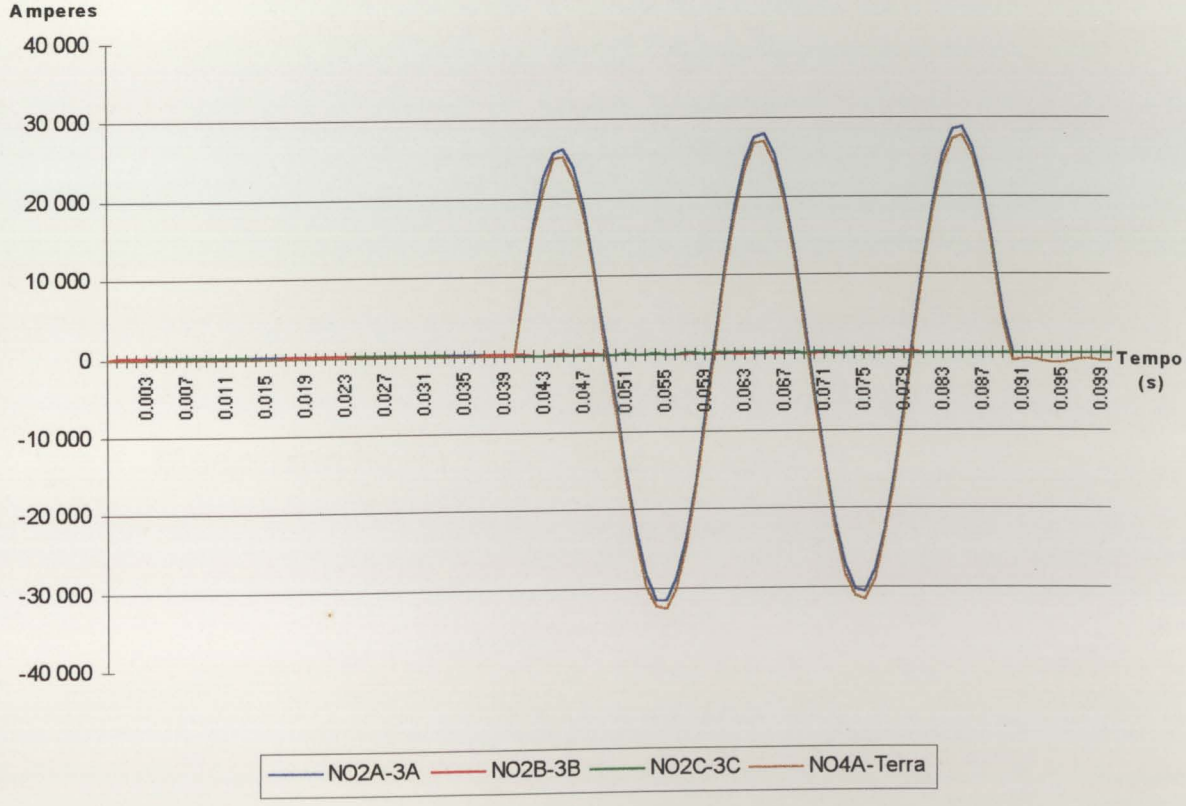


Figura 3.12 e 3.13 - Intensidades de corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 2C-3C e 4A-Terra antes e pós-defeito (curto-circuito fase-terra) numa linha representada pelo esquema equivalente em Π com acoplamentos entre fases.

do interruptor à passagem das intensidades de correntes por zero.

Na figura 3.13 apresenta-se o andamento das correntes nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 3C-3C e 4A-terra, com a escala escolhida de acordo com a ordem de grandeza da intensidade de corrente de curto-circuito. Nesta figura, identifica-se um segundo período, pós-defeito, com a intensidade de corrente na fase com defeito a atingir valores elevados e a curva da intensidade de corrente fase A-terra a atingir valores da mesma ordem de grandeza da anterior.

Capítulo 4

Modelização de Transformadores

4 - MODELIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES

4.1 - Introdução

Os transformadores são máquinas estáticas, que permitem alterar os valores eficazes da tensão/intensidade de corrente, adequando-as à sua aplicação imediata. Se é necessário transportar a energia a grandes distâncias, são utilizados transformadores elevadores para elevar o valor eficaz da tensão e baixar o valor eficaz das intensidades de corrente. Chegando às zonas de consumo, o valor eficaz da tensão é sucessivamente adaptado, sempre com recurso a transformadores, aos vários escalões de tensão que os clientes utilizam.

Os transformadores, pelos motivos apontados, são componentes importantes dos SEE.

4.2 - Modelo teórico de transformadores

4.2.1 - Transformadores monofásicos

Os transformadores monofásicos, quanto ao circuito magnético, podem ter núcleo de colunas (*core type*) ou núcleo couraçado (*shell type*). Quanto à disposição das bobinas, os de colunas usam bobinas concêntricas e os segundos bobinas alternadas.

As equações de funcionamento de um transformador são:

$$\underline{V}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_1.\underline{I}_1 \qquad (4.1)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{V}_2 + \underline{Z}_2.\underline{I}_2 \qquad (4.2)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}'_1 \qquad (4.3)$$

$$\frac{\underline{E}_1}{\underline{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (4.4)$$

$$\underline{I}'_1 = -\frac{N_2}{N_1}.\underline{I}_2 \qquad (4.5)$$

$$\underline{E}_1 = -j\omega N_1 \frac{\phi_M}{\sqrt{2}} \tag{4.6}$$

$$\underline{E}_2 = -j\omega N_2 \frac{\phi_M}{\sqrt{2}} \tag{4.7}$$

Nestas expressões:

$\underline{V}_1$ - tensão aplicada no enrolamento primário;

$\underline{V}_2$ - tensão no enrolamento secundário;

$\underline{E}_1$ - f.e.m. do enrolamento primário;

$\underline{E}_2$ - f.e.m. do enrolamento secundário;

$\underline{I}_1$ - intensidade de corrente no primário;

$\underline{I}'_1$ - intensidade de corrente no primário descontando $\underline{I}_0$;

$\underline{I}_0$ - intensidade de corrente representando as perdas no ferro e a magnetização do circuito magnético;

$\underline{Z}_1$ - impedância de fugas do primário (r_1+jx_1);

$\underline{Z}_2$ - impedância de fugas do secundário (r_2+jx_2);

N_1 - numero de espiras do enrolamento primário;

N_2 - numero de espiras do enrolamento secundário;

$\underline{\phi}_M$ - fluxo magnético máximo.

O circuito equivalente de um transformador monofásico, como mostra a figura 4.1, pode ser representado a partir das equações (4.1) e (4.2), considerando-se os enrolamentos ideais, onde são geradas as f.e.m. $\underline{E}_1$ e $\underline{E}_2$ e associadas a impedâncias $\underline{Z}_1$ e $\underline{Z}_2$. A equação (4.3) corresponde à existência de uma derivação no circuito do primário absorvendo a intensidade de corrente $\underline{I}_0$.

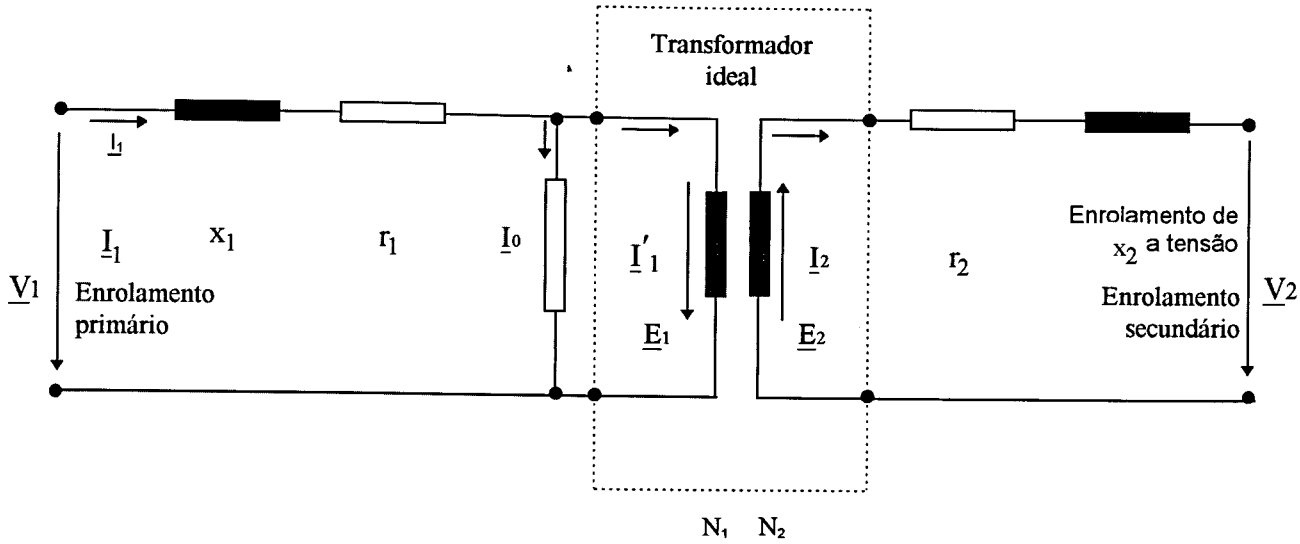


Figura 4.1 - Circuito equivalente de um transformador monofásico

A zona a tracejado corresponde ao transformador ideal, ou seja, os seus enrolamentos possuem resistência e reactância nulas. Os valores das resistências e reactâncias dos enrolamentos r_1, x_1, r_2 e x_2 são colocados fora do transformador ideal referido. Neste transformador ideal não existem, por isso, quedas de tensão e perdas de energia. Neste âmbito, o circuito em derivação, fora da zona tracejada, modeliza a energia necessária à magnetização e as perdas no ferro.

Ligando ao primário e secundário do transformador ideal impedâncias que provoquem quedas de tensão associadas a perdas por efeito de joule nos enrolamentos e a fluxos magnéticos de fugas dos enrolamentos primário e secundário, como é mostrado na figura 4.1, obtemos o modelo do transformador real.

A intensidade de corrente $\underline{I}_0$ pode ser decomposta em duas parcelas.

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_a + \underline{I}_m \qquad (4.8)$$

sendo:

$\underline{I}_a$ - intensidade de corrente associadas às perdas no ferro;

$\underline{I}_m$ - intensidade de corrente de magnetização.

Como mostra a figura 4.2, passam a existir dois ramos em paralelo, estando a intensidade de corrente $\underline{I}_a$, associada às perdas no ferro, em fase com a tensão aplicada ao ramo

correspondente, pelo que pode considerar que percorre a resistência R_0. A intensidade de corrente $\underline{I}_m$, intensidade corrente de magnetização, encontra-se atrasada de 90^0 em relação à mesma tensão, pelo que se pode considerar que percorre a reactância pura X_0.

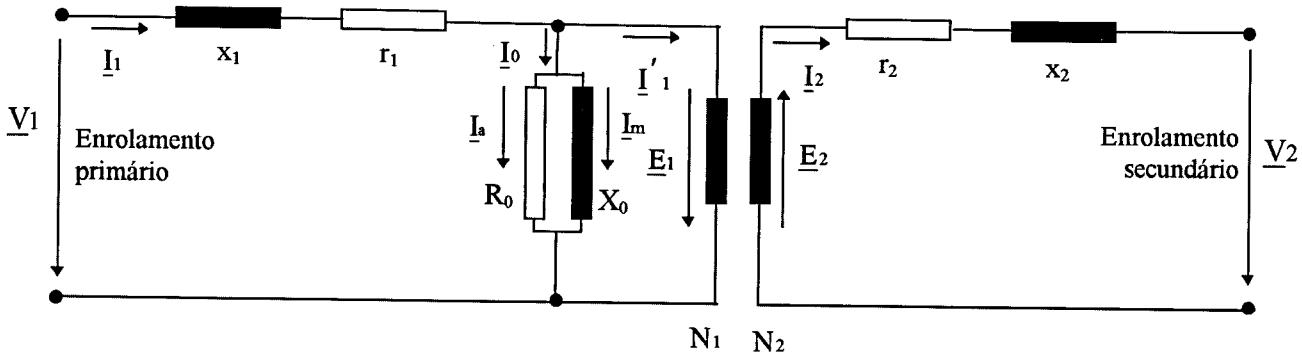


Figura 4.2 - Circuito equivalente de um transformador monofásico com a representação dos circuitos de perdas no ferro e de magnetização

4.2.2 - Circuito equivalente referido a um enrolamento

A simplificação do modelo dos transformadores é possível pela obtenção de um circuito equivalente referido a um único enrolamento.

Para que seja válida esta simplificação, é necessário que o enrolamento real e o equivalente absorvam ou forneçam a mesma potência eléctrica e produzam os mesmos efeitos magnéticos. A igualdade de potências absorvidas traduz-se pela expressão:

$$\underline{V}_1.\underline{I}^*_1 = \underline{V}_{12}.\underline{I}^*_{12} \qquad (4.9)$$

em que o índice 12, corresponde a grandezas do primário referidas ao secundário. A igualdade de efeitos magnéticos, ou seja, f.m.m. iguais, tendo em conta o esfasamento de 180^0 entre as grandezas do primário e do secundário, é traduzida pela expressão:

$$N_1.\underline{I}_1 = -N_2.\underline{I}_{12} \qquad (4.10)$$

A expressão (4.10), pode ser reescrita obtendo-se :

$$\underline{I}_{12} = -\frac{N_1}{N_2}\underline{I}_1 \qquad (4.11)$$

Substituindo a expressão (4.11) em (4.9) obtém-se:

$$\underline{V}_{12} = -\frac{N_2}{N_1}\underline{V}_1 \qquad (4.12)$$

O circuito equivalente da figura 4.2, evoluirá para o esquema representado na figura 4.3, onde as grandezas do primário são referidas ao secundário. As grandezas do primário referidas ao secundário serão calculadas a partir das expressões (4.11) e (4.12).

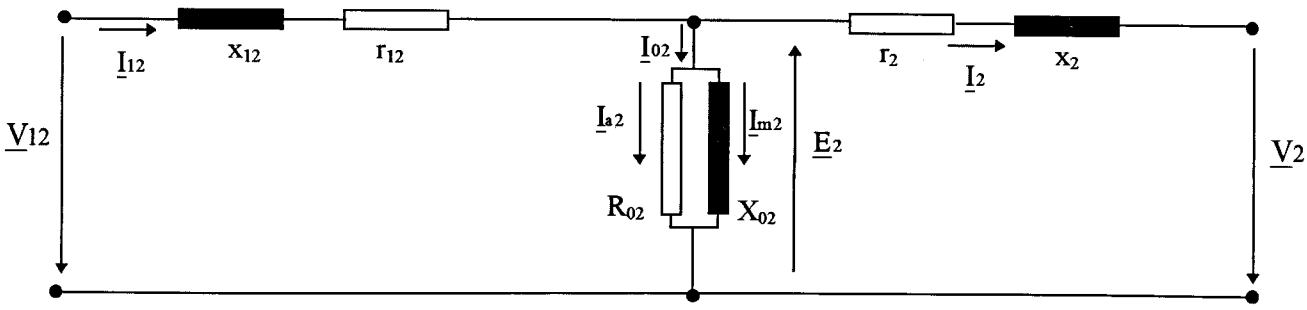


Figura 4.3 - Circuito equivalente de um transformador monofásico referido ao enrolamento secundário

4.2.3 - Transformadores trifásicos

Havendo uma generalização da produção, transporte e distribuição de energia em corrente alternada trifásica, revela-se imprescindível o uso de transformadores trifásicos.

À semelhança dos transformadores monofásicos, nos transformadores trifásicos o circuito magnético podem ter núcleo de colunas (*core type*) ou núcleo couraçado (*shell type*). Da mesma maneira quanto à disposição das bobinas, os de colunas usam bobinas concêntricas e os segundos bobinas alternadas.

Os transformadores trifásicos podem também ser constituídos por três transformadores monofásicos iguais sendo conhecidos, neste caso, por bancos de transformadores monofásicos.

Pode-se considerar que um banco de transformadores é composto por três transformadores monofásicos em que os seus terminais poderão estar ligados normalmente em triângulo ou estrela.

4.3 - Programa EMTP

4.3.1 - Modelização do transformador monofásico

O transformador monofásico é modelizado como se fosse um transformador ideal. A figura 4.4 mostra o circuito equivalente do modelo utilizado.

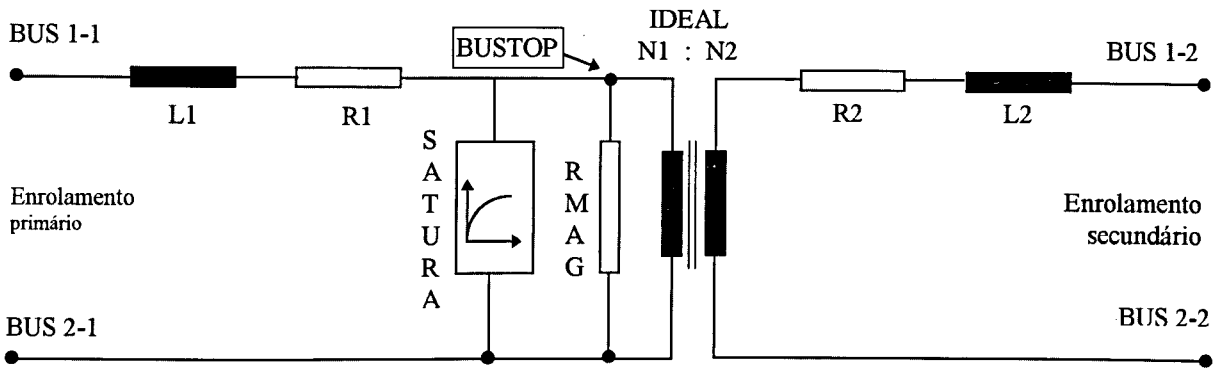


Figura 4.4 - Circuito equivalente do modelo utilizado para o transformador monofásico

O enrolamento primário tem associado uma impedância $\underline{Z}_1 = (R1+jwL1)$ e o secundário uma impedância $\underline{Z}_2 = (R2+jwL2)$. O efeito da saturação do circuito magnético é modelizado através do ramo SATURA, representando uma indutância não linear. As perdas no ferro são modelizadas através de uma resistência RMAG.

4.3.2 - Modelização do transformador trifásico

Nos transformadores trifásicos em que o seu circuito magnético tem um núcleo do tipo couraçado (*shell type* com 3 pernas) ou de colunas (*core type* com 5 pernas) e, se se verificar que a indução magnética nas três fases é independente, somente é necessário uma curva de magnetização. Nesta situação, o modelo deste tipo de transformador poderá utilizar 3 transformadores monofásicos idênticos.

A título de exemplo, a figura 4.5 representa o esquema de um transformador trifásico com o primário em triângulo e o secundário em estrela, com o ponto comum ligado á terra.

4.3.3 - Formato dos dados

4.3.3.1 - Transformador monofásico

A sequência dos dados de entrada a especificar para utilização do programa EMTP terá que ser a seguinte:

- a primeira linha é uma linha especial de dados, iniciando-se pela palavra "TRANSFORMER";
- uma ou mais linhas a definir o tipo de magnetização, e em que a reactância de magnetização poderá ser:
  - . desprezada, por isso não existindo;
  - . linear, ocupando só uma linha;
  - . não linear, sendo necessário neste caso calcular a curva de saturação com a ajuda da rotina Satura;
- linha com um código especial a terminar os dados referentes ao tipo de magnetização;
- dados sobre os vários enrolamentos existentes no transformador.

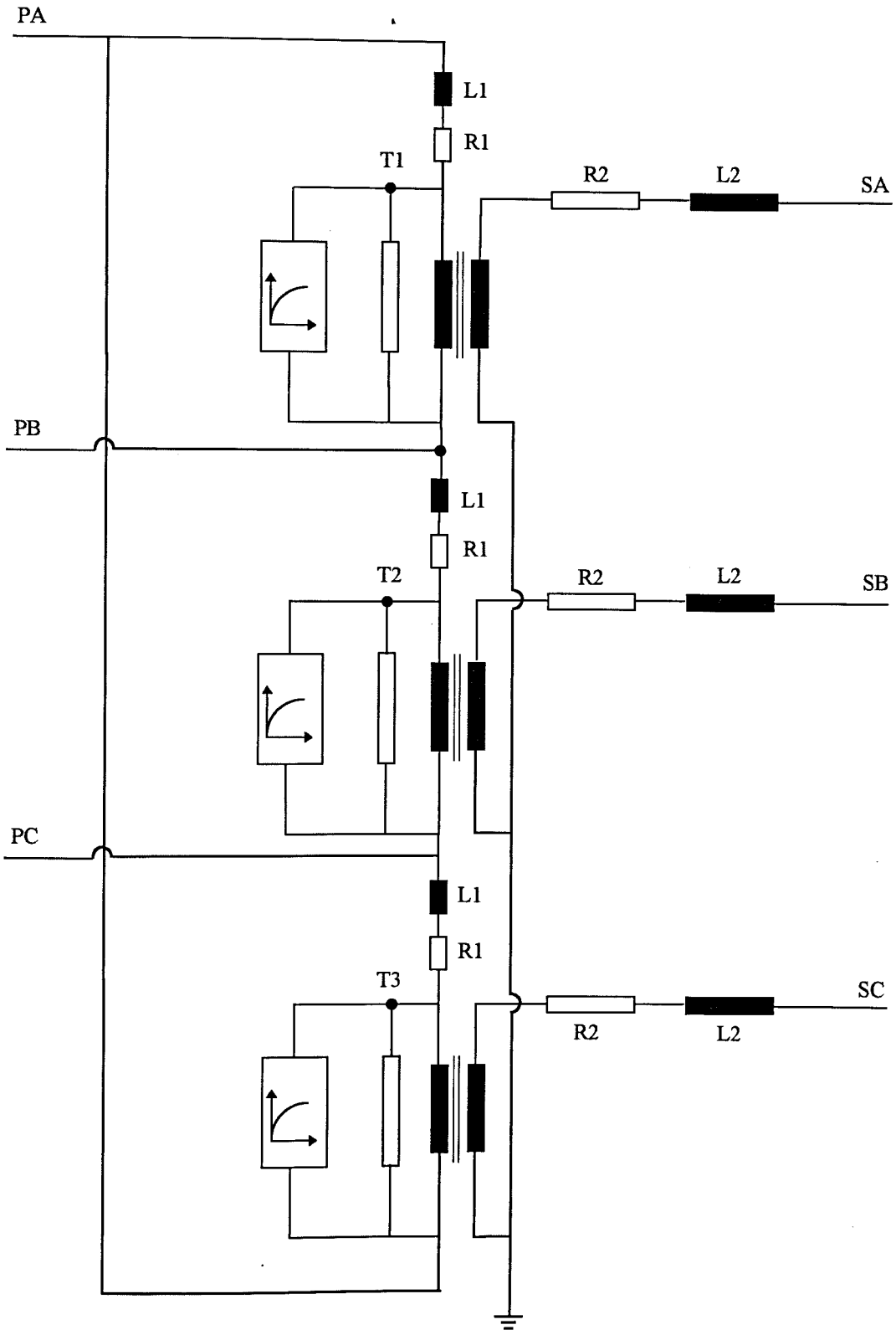


Figura 4.5 - Circuito equivalente do modelo utilizado para o transformador trifásico

A tabela 4.1 mostra o formato dos dados da primeira linha.

TRANSFORMER		E6.2	E6.2	A6	E6.2	I
request word		I steady-state	FLUX	BUSTOP	Rmag	flag

Tabela 4.1 - Formato dos dados da primeira linha

Nesta tabela:

I, FLUX (corrente, fluxo): representa o ramo de magnetização no enrolamento do primário, sendo neste caso a indutância linear. Estes valores correspondem a valores de pico expressos, respectivamente, em Ampere e Volt.segundo. No caso em que a reactância de magnetização não é linear, este par será o primeiro a utilizar pela rotina Satura. O mesmo par deverá corresponder a 70 % do valor máximo do fluxo;

BUSTOP: Nome do nó interno colocado no enrolamento primário e que referencia o ramo de magnetização (ver figura 4.4).

Rmag: Resistência linear em paralelo com a reactância de magnetização, (ver figura 4.4) e calculada da seguinte forma:

$$R_{mag} = \frac{VRAT^2}{P_{exloss}} \qquad (4.13)$$

Nesta expressão:

VRAT - Tensão nominal (*rated voltage*) no primário;

P_{exloss} - Perdas de excitação.

flag: definição da variável de saída (a imprimir/escrever) referente ao ramo da reactância de magnetização onde se poderá especificar:

- valor 1, a intensidade de corrente é especificada como variável de saída;
- valor 2, a tensão é especificada como variável de saída;
- valor 3, a intensidade de corrente e a tensão são especificadas como variáveis de saída.

A tabela 4.2 mostra o formato dos dados onde se define o tipo de magnetização.

E16.0	E16.0
I	FLUX
one (current-flux) pair	

Tabela 4.2 - Formato dos dados para especificar o tipo de magnetização

Nesta tabela:

I, FLUX (corrente, fluxo): pares (o primeiro é introduzido na primeira linha) que permitem modelizar a curva de saturação a utilizar pela rotina Satura. Este conjunto de linhas termina com uma linha com um código especial "9999", como mostra a tabela 4.3.

9999

Tabela 4.3 - Código especial para terminar a curva de magnetização

A tabela 4.4 mostra o formato dos dados dos enrolamentos.

I 2	A6	A6		E6.2	E6.2	E6.2		I
K	BUS1	BUS2		R	L	VRAT		I P
	node names			leakage impedance				

Tabela 4.4 - Formato dos dados dos enrolamentos

Nesta tabela:

K: Número do enrolamento (1, 2, ...,N);

BUS1, BUS2: Nome dos nós pertencentes à rede eléctrica onde está ligada o enrolamento de ordem K. Se se pretender ligar um dos terminais do transformador à terra, o campo respectivo deverá ser colocado em branco;

R, L: resistência (ohm) e indutância (ohm ou mH dependente do valor de XOPT) referentes ao enrolamento K e calculados a partir da impedância;

VRAT: Tensão nominal (*rated voltage*) em kV do enrolamento K.

IP: Colocando 1, permite obter a intensidade de corrente que circula entre o nó "BUS1" e o "BUSTOP", do primeiro enrolamento, sendo então colocado no primeiro enrolamento;

4.3.3.2 - Transformador trifásico

A sequência dos dados a utilizar pelo programa EMTP deverá ser a seguinte:

- Dados referentes à primeira unidade monofásica, idênticos aos dados do transformador monofásico;
- Dados referentes à segunda unidade monofásica;
- Dados referentes à terceira unidade monofásica.

O formato dos dados da segunda e terceira unidades monofásicas é idêntica. As tabelas 4.5 e 4.6 apresentam o formato dos dados destas unidades.

TRANSFORMER	A6		A6	I
request word	REFBUS		BUSTOP	flag

Tabela 4.5 - Formato dos dados das 2ª e 3ª unidades dos transformadores trifásicos

I 2	A6	A6		I
K	BUS1	BUS2		I P
	node names			

Tabela 4.6 - Formato dos dados das 2ª e 3ª unidades dos transformadores trifásicos

Nestas tabelas:

REFBUS: Nome do nó interno associado à variável BUSTOP;

BUSTOP: Nome do nó interno colocado no enrolamento primário e que referencia o ramo de magnetização;

flag: definição da variável de saída (a imprimir/escrever) referente ao ramo da reactância de magnetização onde se poderá definir:

- valor 1, a intensidade de corrente é especificada como variável de saída;
- valor 2, a tensão é especificada como variável de saída;

- valor 3, a intensidade de corrente e a tensão são especificadas como variáveis de saída.

K: Número do enrolamento (1, 2, ...,N);

BUS1, BUS2: Nome dos nós pertencentes à rede eléctrica onde está ligado o enrolamento de ordem K. Se se pretender ligar um dos terminais do transformador à terra o campo respectivo deverá ficar em branco;

IP: Colocando 1, permite obter a intensidade de corrente que circula entre o nó "BUS1" e o "BUSTOP", do primeiro enrolamento, sendo então colocado no primeiro enrolamento.

4.4 - Exemplo 3

4.4.1 - Dados da simulação

O exemplo 3 simula um curto-circuito trifásico no secundário de um transformador (Tp) ligado a uma rede de 60 kV apresentada na figura 4.6.

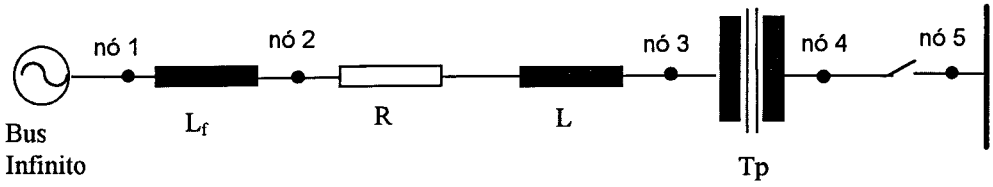


Figura 4.6 - Esquema da rede do exemplo 3 onde se vai simular um curto circuito

Os dados do exemplo3 são:

- A indutância da fonte L_f (nó1-nó2), é calculada a partir da potência de curto-circuito no ponto de ligação da linha à rede a montante (20 GVA). A indutância equivalente da rede será:

$$L_f = \frac{1}{314} \cdot \frac{60^2}{20000} = 0{,}573\text{mH}$$

- A linha existente entre os nós 2 e 3 é representada pelo esquema equivalente em Π e possuindo as características seguintes:

. R = 2,9988 Ω;

. L = 8,4010 mH;

- O transformador tem as seguintes características:

. S = 25 MVA, grupo de ligação é YY, tensões 60/30 kV;

. A potência de base será a potência do transformador (25 MVA) e as impedâncias de base primária e secundária são:

$$Z_{base(P)} = \frac{60^2}{25} = 144\Omega$$

$$Z_{base(S)} = \frac{30^2}{25} = 36\Omega$$

$$X_P = \frac{0,100}{2} x144x3 = 21,6\Omega$$

$$Z_S = \frac{0,100}{2} x36x3 = 5,4\Omega$$

- O gerador do barramento infinito será caracterizado por:

. A amplitude $E = \frac{60}{\sqrt{3}}.\sqrt{2} = 48,990$ kV (tensão simples máxima);

- A frequência igual a 50 Hz;

- As fases:

. fase A - a fase da tensão é "0";

. fase B - a fase da tensão é "-120";

. fase C - a fase da tensão é "-240".

O ficheiro com os dados de entrada do exemplo3 são apresentados na listagem 4.1.

4.4.2 - Resultados da simulação

Na listagem 4.2 (anexo C), encontram-se os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico no secundário de um transformador 60/30 kV. O gráfico apresentado na figura

```
Ln                                                  PROGRAMA
 1 C         1         2         3         4         5         6         7         8
 2 C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 3 BEGIN NEW DATA CASE
 4 $CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
 5 $OPEN, UNIT=4 FILE=EXEMPLO3.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN RECL=8000
 6 C Ficheiro - exemplo3.dat
 7 C Definição de dados gerais reais
 8 C
 9 C DELTAT     TMAX      XOPT      COPT   EPSILN   TOLMAT   TSTART
10   50.E-6 100.E-3    0.E+0     0.E+0      0.0      0.0      0.0
11 C
12 C Definição de dados gerais inteiros
13 C
14 C    IOUT    IPLOT   IDOUBL   KSSOUT   MAXOUT     IPUN   MEMSAV     ICAT   NENERG   IPRSUP
15        10        1        1        1        1        0        0        1        0        0
16 C
17 C Definição de dados dos ramos
18 C
19 C Impedancia da fonte
20 C
21 C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R        L        C
22   NO1A   NO2A                    0.0    0.573      0.0                                    0
23   NO1B   NO2B   NO1A   NO2A                                                                0
24   NO1C   NO2C   NO1A   NO2A
25 C
26 C Linha em equivalente PI (SEM ACOPLAMENTOS)
27 C
28 C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R        L        C        R        L        C        R        L        C
29   USE RL
30  1NO2A   NO3A                 2.99888.4010        0
31  2NO2B   NO3B                                 2.99888.4010        0
32  3NO2C   NO3C                                                 2.99888.4010        0
33 C
34 C ----- Transformador
35 C
36   TRANSFORMER                                  TRAN A
37 9999
38  1NO3A                                 21.6    34.64
39  2NO4A                                  5.4    17.32
40   TRANSFORMER TRAN A                          TRAN B
41  1NO3B
42  2NO4B
43   TRANSFORMER TRAN A                          TRAN C
44  1NO3C
45  2NO4C
46 BLANK CARD finalizando dados dos ramos
47 C
48 C Definição dos dados dos interruptores
49 C
50 C Interruptor principal
51 C
52 C BUS1   BUS2        TCLOSE      TOPEN        IE
53   NO4A   NO5A          -1.0        1.1       0.0                                            1
54   NO4B   NO5B          -1.0        1.1       0.0                                            1
55   NO4C   NO5C          -1.0        1.1       0.0                                            1
```

Listagem 4.1 - Ficheiro (exemplo3.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador trifásico

```
C
C  Interruptor que cria o curto-circuito
C
C  BUS1   BUS2          TCLOSE        TOPEN          IE
   NO5A                 40.E-3          1.1          0.0                                  1
   NO5B                 40.E-3          1.1          0.0                                  1
   NO5C                 40.E-3          1.1          0.0                                  1
BLANK CARD finalizando dados dos interruptores
C
C  Definição dos dados das fontes
C
C  NAME        AMPLITUDE  FREQUENCY        PHASE          A1                  TSTART       TSTOP
14NO1A          48990.0        50.0          0.0                                -1.0
14NO1B          48990.0        50.0       -120.0                                -1.0
14NO1C          48990.0        50.0       -240.0                                -1.0
BLANK CARD finalizando dados das fontes
C
C  Definição das vari veis de saida (tensÆo dos n¢s)
C
C  BUS1   BUS2   BUS3   BUS4   BUS5   BUS6
   NO3A   NO3B   NO3C
BLANK CARD finalizando definição das vari veis de saida
C
C  Definição das saidas para plotter
C
BLANK CARD finalizando definição das saidas para plotter
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
BLANK CARD finalizando programa de simulação
BLANK CARD finalizando definição das vari veis de saida
C
C  Definição das saidas para plotter
C
BLANK CARD finalizando definição das saidas para plotter
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
BLANK CARD finalizando programa de simulação
```

Listagem 4.1 - Ficheiro (exemplo3.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador trifásico (continuação)

4.7 mostra a evolução temporal das tensões nos nós 3A, 3B e 3C, primário do transformador. As ondas são sinusóides puras, antes do defeito. Após o defeito nota-se o abaixamento do valor de pico. Após um período transitório em que esse abaixamento é mais pronunciado verifica-se que se atinge um regime em que as tensões são de novo representadas por sinusoides puras.

A figura 4.8 apresenta o andamento das ondas de intensidade de corrente nos nós 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C, 5A-terra, 5B-terra e 5C-terra. Num primeiro período até time = 40 ms as intensidades de corrente referidas são nulas já que o transformador se encontra em vazio. Após o defeito, as intensidades de corrente integram uma componente sinusoidal e um amortecimento exponencial atingindo-se rapidamente um regime em que as ondas são representadas por sinusoides puras.

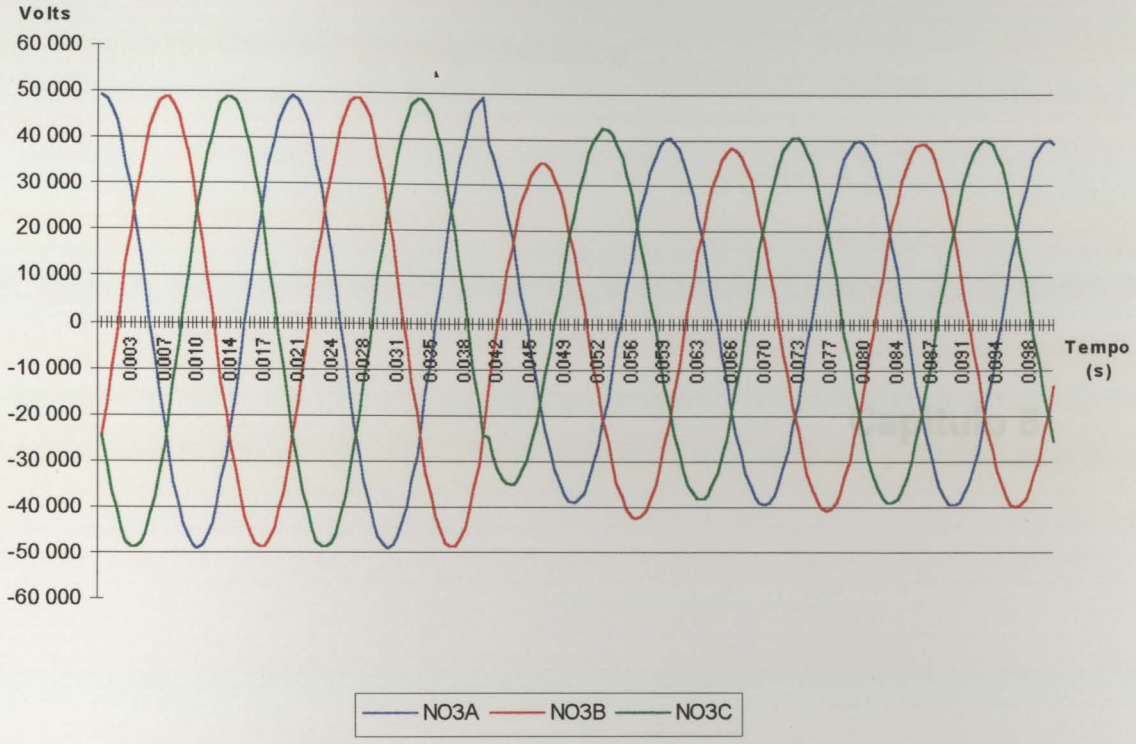


Figura 4.7 - Tensões nos nós 3A, 3B e 3C (terminais do enrolamento do lado primário do transformador inserido na rede)

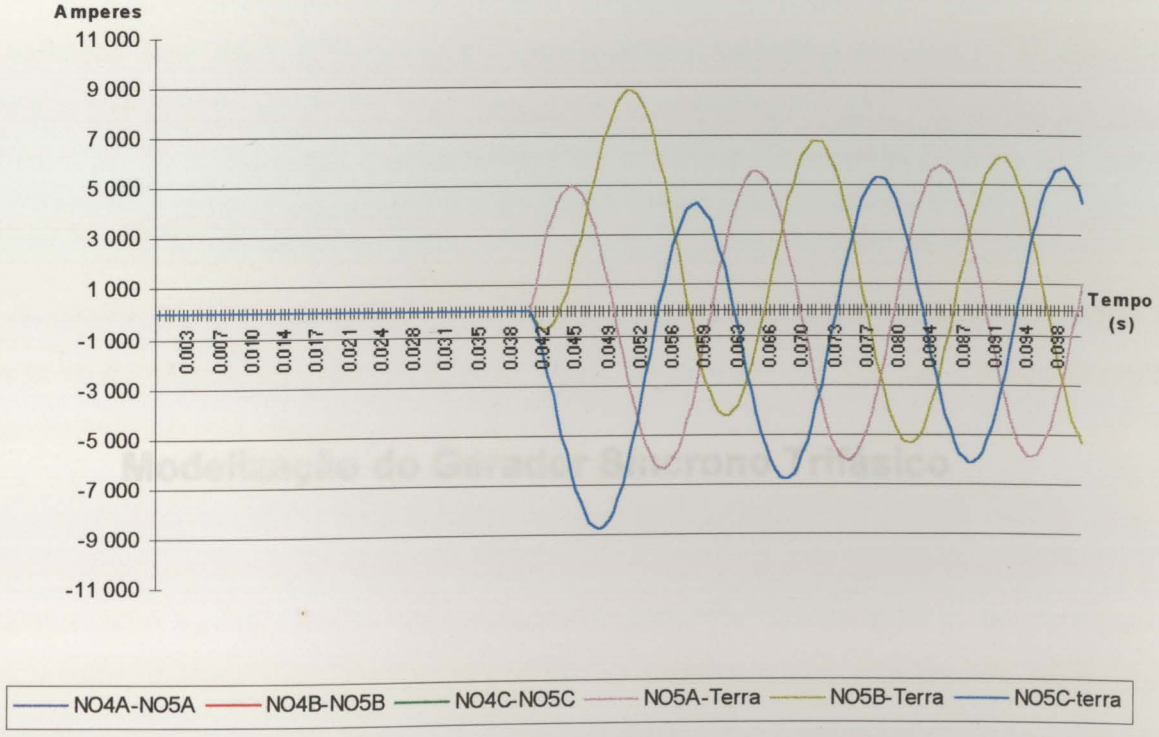


Figura 4.8 - Intensidades de corrente nos nós 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C, 5A-Terra, 5B-Terra e 5C-Terra situado no do lado secundário do transformador inserido na rede em cujos terminais foi simulado um curto circuito trifásico simétrico

Capítulo 5

Modelização do Gerador Síncrono Trifásico

5 - Modelização do Gerador Síncrono Trifásico

5.1 - Introdução

Os geradores de energia eléctrica são as máquinas onde é transformada a energia mecânica em energia eléctrica, com características adaptadas à produção. Portanto, os geradores estão localizados nos centros produtores hídricos, térmicos ou nucleares e, mais recentemente, em pequenos empreendimentos hídricos ou eólicos. Acoplados a máquinas que transformam a emergia primária em energia mecânica é nos geradores que se inicia a cadeia energética do SEE.

5.2 - Aspectos Teóricos [10]

A modelização do alternador síncrono trifásico obriga, devido á sua grande complexidade, a definir condições de estudo simplificativas que se descrevem, em seguida, em pormenor.

São definidos dois eixos distintos. O primeiro, o eixo longitudinal ou directo (d), de simetria magnética que está localizado no polo magnético, e o segundo, o eixo transversal ou eixo em quadratura (q), eixo magnético que se localiza na zona interpolar em avanço de $\pi/2$ radianos eléctricos em relação ao primeiro eixo.

Com o auxílio da transformação entre ângulos geométricos (θ) e ângulos eléctricos (α), converte-se a máquina real, que poderá ter vários pares de polos (p), numa máquina eléctrica bipolar equivalente pela relação:

$$\alpha = p.\theta \qquad (5.1)$$

São desprezadas as capacidades distribuídas entre enrolamentos, ou entre os enrolamentos e a massa metálica da estrutura da máquina por não se pretender, com este modelo, fazer estudos envolvendo variações bruscas de tensão ou de fenómenos com frequência muito elevada.

São também desprezados todos os fenómenos associados ao efeito pelicular, efeito de proximidade nos condutores eléctricos dos diferentes enrolamentos e as corrente de Foucault,

consideradas, se necessário, por circuitos fictícios onde circulam essas correntes eléctricas, gerando-se os mesmos efeitos magnéticos.

Considera-se que os materiais ferromagnéticos do circuito magnético não tem histerese magnética, desprezando-se as perdas magnéticas. Além disso, considera-se que o ponto de funcionamento do gerador se encontra sempre na parte rectilínea da característica de magnetização havendo sempre, desta maneira, uma relação constante entre as intensidade de corrente e o fluxo magnético por elas criado.

Considera-se que a força magnetomotriz é criada por uma bobina concentrada colocada sobre o eixo de referência, a sua forma de onda tem uma variação sinusoidal no espaço, tendo o valor máximo na direcção do eixo polar, sendo desprezados todos os termos harmónicos retendo-se apenas o fundamental. São também desprezados os harmónicos de ranhura, que são devido à variação periódica da relutância do circuito magnético, devido às ranhuras do estator e do rotor.

Considera-se que a força electromotriz induzida nos condutores do enrolamento estatórico, pela lei da indução magnética, *Lei de Faraday*, terá uma variação sinusoidal no tempo, pois se considerou já existir uma relação linear entre a intensidade do campo magnético e a indução magnética e, por isso, a variação espacial da indução magnética no entreferro da máquina também será sinusoidal.

Os circuitos amortecedores, através da transformação utilizando a *Transformação do número de fases,* são reduzidos a um enrolamento difásico constituído pelas bobines Kd e Kq, colocadas respectivamente num eixo coincidente com a direcção polar (d) e num eixo coincidente com a direcção interpolar (q), que está em quadratura e avanço em relação ao primeiro eixo, como é representado na figura 5.1.

Como mostra a figura 5.1, a modelização do alternador síncrono trifásico é realizada por um conjunto de circuitos eléctricos interligados pelo campo magnético.

As bobines concentradas (a, b e c) representam o circuito eléctrico estatórico colocadas no espaço em três eixos complanares e esfasados nos espaços de $2\pi/3$ radianos eléctricos.

A bobine indutora f colocado no eixo directo (d) e as bobines Kd e Kq colocadas respectivamente no eixo directo (d) e no eixo em quadratura (q) constituem o circuito rotórico. O sistema eléctrico rotórico assim como o seu referêncial (r: d,q), rodam com uma velocidade angular eléctrica dada pela expressão:

$$\omega r = \frac{d\alpha r}{dt} = \frac{p.d\theta r}{dt} \tag{5.2}$$

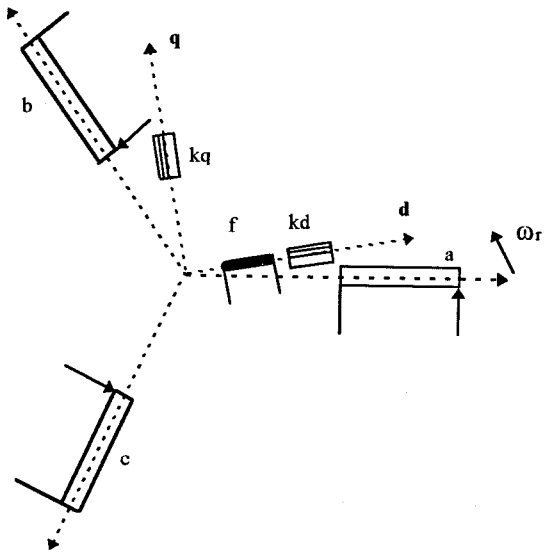


Figura 5.1 - Esquema eléctrico do alternador síncrono trifásico modelizado

As resistências do estator são consideradas todas iguais $Ra = Rb = Rc = Rs$. Todas as grandezas associadas ao estator são afectadas do índice s. A matriz das resistências eléctricas dos circuitos do estator é uma matriz diagonal ou seja:

$$[Rs] = diag[Ra, Rb, Rc] = diag[Rs, Rs, Rs] \tag{5.3}$$

A matriz das resistências eléctricas do circuito do rotor é uma matriz diagonal, com estas grandezas afectadas do índice r, ou seja:

$$[Rr] = diag[Rf, Rkd, Rkq] \tag{5.4}$$

Assim, a matriz das resistências eléctricas dos diferentes circuitos é dada por:

$$[R] = diag[Ra, Rb, Rc, Rf, Rkd, Rkq] = diag[Rs, Rs, Rs, Rf, Rkd, Rkq] \tag{5.5}$$

Os coeficientes de auto-indução e de indução mútua dos diferentes circuitos eléctricos ligados pelo campo magnético do alternador síncrono trifásico são determinados atendendo às características construtivas próprias de cada circuito e atendendo à distribuição da força magnetomotriz criada por cada bobina.

Com as condições anteriormente referidas, ou seja, constituição do estator, propriedades do circuito magnético e considerando que à força magnetomotriz é sinusoidal, para o rotor de polos salientes, a expressão para a força magnetomotriz da bobine (a) será dada por:

$$fa(\alpha r) = Fa.\cos(\alpha r) = Nea.ia.\cos(\alpha r) \qquad (5.6)$$

em que Nea é o número efectivo de espiras da bobine (a), e αr é o ângulo entre um eixo da mesma bobine e eixo magnético rotórico **d**.

A força magnetomotriz indutora é decomponível segundo os dois eixos **d** e **q**, e como neste caso, rotor de polos salientes, a relutância do circuito magnético R_m é diferente consoante o eixo, por existirem percursos no entreferro, sendo $R_{mq} > R_{md}$, as expressões ficam:

$$fad = Fa.\cos\alpha r \qquad (5.7)$$

$$faq = -Fa.\operatorname{sen}\alpha r \qquad (5.8)$$

O fluxo de indução magnética médio por espira é dado pela expressão:

$$\phi = F/Rm \qquad (5.9)$$

Como as condições de estudo tornam a relutância do circuito magnético $Rm = l/\mu.S$ constante substituindo nas expressões (5.7) e (5.8) a expressão (5.9) obtêm-se as expressões para o fluxo segundo os eixos eixos magnéticos rotóricos **d** e **q**:

$$\phi ad = (Fa/Rmd).\cos\alpha r \qquad (5.10)$$

$$\phi aq = -(Fa/Rmq).\operatorname{sen}\alpha r \qquad (5.11)$$

e segundo o eixo (a), eixo onde se localiza a bobine (a):

$$\phi' ad = \phi ad.\cos\alpha r \qquad (5.12)$$

$$\phi' aq = -\phi aq.\operatorname{sen}\alpha r \qquad (5.13)$$

Além dos fluxos ϕ'_{ad} e ϕ'_{aq}, o fluxo de fugas $\phi\sigma$ contribui também para o fluxo médio por espira que envolve a bobine a. O fluxo médio por espira segundo o eixo da fase a é dado pela expressão:

$$\phi a = (\phi ad \cos \alpha r) - (-\phi aq \operatorname{sen} \alpha r) + \phi\sigma \qquad (5.14)$$

Substituindo na expressão (5.14) as expressões (5.10) e (5.11) obtém-se:

$$\phi a = Fa.((1/Rmd).\cos^2 \alpha r + (1/Rmq).\operatorname{sen}^2 \alpha r) + \phi\sigma \qquad (5.15)$$

Como $\cos^2 \alpha r = (1+\cos 2\alpha r)/2$ e $\operatorname{sen}^2 \alpha r = (1-\cos 2\alpha r)/2$ a expressão (5.15) ficará:

$$\phi a = (Fa/(2.Rmd.Rmq)).(Rmd + Rmq) + (Fa/(2.Rmd.Rmq)).(Rmd - Rmq).\cos 2\alpha r + \phi\sigma \qquad (5.16)$$

O fluxo totalizado da fase a é igual a:

$$\psi a = Nea.\phi a \qquad (5.17)$$

O coeficiente de auto-indução da fase a será dado pela expressão:

$$La = \psi a / ia = (Nea^2/(2.Rmd.Rmq)).((Rmd + Rmq) + (Rmd - Rmq).\cos 2\alpha r) + (Nea/ia).\phi\sigma \qquad (5.18)$$

A expressão (5.18) poderá ser reescrita com:

$$La = LA + LB.\cos(2\alpha r) + l\sigma \qquad (5.19)$$

em que:

$$LA = (Nea^2/(2.Rmd.Rmq)).(Rmd + Rmq) \qquad (5.20)$$

$$LB = (Nea^2/(2.Rmd.Rmq)).(Rmd - Rmq) \qquad (5.21)$$

$$l\sigma = (Nea/ia).\phi\sigma \qquad (5.22)$$

Os coeficientes de auto-indução das fases b e c, podem ser obtidos pela simples substituição do ângulo αr, pelo ângulo de posição da respectiva fase. As expressões para os coeficientes de auto-indução das fases b e c são dadas por:

$$Lb = LA + LB.\cos(2\alpha r + 2\pi/3) + l\sigma \tag{5.23}$$

$$Lc = LA + LB.\cos(2\alpha r + 4\pi/3) + l\sigma \tag{5.24}$$

Os coeficientes de indução mútua M das bobinas do circuito estatórico podem ser encontrados de forma idêntica à utilizada para encontrar os coeficientes de auto-indução. Os coeficientes de indução mútua entre as fases ab, bc e ca, são dados pelas expressões:

$$Mab = -LA/2 + LB.\cos(2\alpha r - 2\pi/3) \tag{5.25}$$

$$Mbc = -LA/2 + LB.\cos(2\alpha r) \tag{5.26}$$

$$Mca = -LA/2 + LB.\cos(2\alpha r - 4\pi/3) \tag{5.27}$$

Verifica-se que, devido à simetria e às propriedades lineares do circuito magnético e outros aspectos construtivos já considerados, os coeficientes de indução mútua tem a relação:

$$Mab = Mba \tag{5.28}$$

$$Mbc = Mcb \tag{5.29}$$

$$Mca = Mac \tag{5.30}$$

Devido à anisotropia do circuito magnético de uma máquina de pólos salientes, existe uma dependência directa entre os coeficientes de auto-indução e de indução mútua e do ângulo de posição do rotor αr, expressa pela expressão geral:

$$L(\alpha r) = LA.\cos(\gamma) + LB.\cos(2\alpha r) \tag{5.31}$$

sendo γ o ângulo de posição do eixo da bobine.

As indutâncias do estator, de uma máquina de pólos salientes, podem ser reunidas numa matriz das indutâncias próprias do estator $[Lss]$:

$$[Lss]=\begin{bmatrix} LA + LB.\cos(2\alpha r) + l\sigma & (-LA/2) + LB.\cos(2\alpha r - (2\pi/3)) & (-LA/2) + LB.\cos(2\alpha r + (2\pi/3)) \\ (-LA/2) + LB.\cos(2\alpha r - (2\pi/3)) & LA + LB.\cos(2\alpha r + (2\pi/3)) + l\sigma & (-LA/2) + LB.\cos(2\alpha r) \\ (-LA/2) + LB.\cos(2\alpha r + (2\pi/3)) & (-LA/2) + LB.\cos(2\alpha r) & LA + LB.\cos(2\alpha r + (2\pi/3)) + l\sigma \end{bmatrix}$$

(5.32)

Com o indutor cilíndrico, não existe diferença de relutância do circuito magnético entre o eixo directo e em quadratura. Assim as relutâncias R_{md} e R_{mq} são iguais pelo que se anulam os termos função do ângulo de posição αr simplificando-se as equação (5.19), (5.23) e (5.24) dos coeficientes de auto-indução:

$$La = LA + l\sigma \tag{5.33}$$

$$Lb = LA + l\sigma \tag{5.34}$$

$$Lc = LA + l\sigma \tag{5.35}$$

e as equações (5.25), (5.26) e (5.27) dos coeficientes de indução mútua:

$$Mab = -LA/2 \tag{5.36}$$

$$Mbc = -LA/2 \tag{5.37}$$

$$Mca = -LA/2 \tag{5.38}$$

A matriz das indutâncias próprias do estator (5.32) ficará agora com a forma:

$$[Lss]=\begin{bmatrix} LA + l\sigma & (-LA/2) & (-LA/2) \\ (-LA/2) & LA + l\sigma & (-LA/2) \\ (-LA/2) & (-LA/2) & LA + l\sigma \end{bmatrix} \tag{5.39}$$

Os coeficientes de auto-indução e de indução mútua dos circuitos eléctricos rotóricos não dependem do tipo de rotor, polos salientes ou cilíndrico, já que a distribuição do fluxo magnético é realizada num circuito magnético que apresenta sempre a mesma relutância, independentemente da posição do rotor. A matriz das indutâncias próprias do rotor $[L_{rr}]$ é apresentada em seguida:

$$[L_{rr}]=\begin{bmatrix} L_f & M_{fkd} & 0 \\ M_{fkd} & L_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \qquad (5.40)$$

sendo L_f, L_{kd} e L_{kq}, os coeficiente de auto-indução da bobina indutora e das bobina representativas dos amortecedores segundo os eixos **d** e **q**. Como se considerou que o circuito magnético tem propriedades magnéticas lineares, os coeficientes de indução mútua dos circuitos rotóricos em quadratura espacial são nulos, ou seja:

$$M_{fkq} = M_{kqf} = 0 \qquad (5.41)$$

$$M_{kdkq} = M_{kqkd} = 0 \qquad (5.42)$$

existindo, apenas, o coeficiente de indução mútua M_{fkd}.

Os coeficientes de indução mútua entre as bobinas estatóricas e as rotóricas dependem do ângulo α_r, devido á variação da posição relativa dos eixos das duas bobinas com o movimento do rotor. As expressões que os definem são:

$$m_a = M_{af}.\cos(\alpha_r) \qquad (5.43)$$

$$m_{akd} = M_{akd}.\cos(\alpha_r) \qquad (5.44)$$

$$m_{akq} = -M_{akq}.\,\mathrm{sen}(\alpha_r) \qquad (5.45)$$

Têm o seu valor máximo quando os eixos das respectivas bobinas coincidem e nulo quando os respectivos eixos estão em quadratura eléctrica. Existindo um esfasamento de $\pm 2\pi/3$ radianos eléctricos da bobina estatórica **a**, com as restantes bobinas **b** e **c**, é possível encontrar os

respectivos coeficientes de indução mútua. A matriz das coeficientes de indução mútua $[M_{sr}]$ é apresentada em seguida:

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{af}.\cos(\alpha_r) & M_{akd}.\cos(\alpha_r) & -M_{akq}.\mathrm{sen}(\alpha_r) \\ M_{af}.\cos(\alpha_r - (2\pi/3)) & M_{akd}.\cos(\alpha_r-(2\pi/3)) & -M_{akq}.\mathrm{sen}(\alpha_r-(2\pi/3)) \\ M_{af}.\cos(\alpha_r + (2\pi/3)) & M_{akd}.\cos(\alpha_r+(2\pi/3)) & -M_{akq}.\mathrm{sen}(\alpha_r+(2\pi/3)) \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

Os coeficientes de indução mútua entre as bobinas rotóricas e estatóricas devido à simetria axial da máquina eléctrica e à linearidade das propriedades dos circuitos magnéticos, são iguais aos coeficientes de indução mútua entre as bobinas estatóricas e rotóricas. A matriz dos coeficientes de indução mútua do rotor será a transposta da matriz dos coeficientes de indução mútua do estator:

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t \quad (5.47)$$

A matriz das indutâncias agrupando as diferentes submatrizes ficará:

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

Do ponto de vista mecânico os parâmetros característicos do alternador síncrono trifásico são:

- O coeficiente de atrito **D**, responsável pelo binário de atrito $\mathbf{T_a}$;

- O momento de inércia **J**, responsável pelo binário de inércia $\mathbf{T_j}$.

As expressões que definem estes dois binários são:

$$T_a = D.(d(\alpha_r / p) / dt = D.(\omega_r / p) \quad (5.49)$$

$$T_j = J.(d^2(\alpha_r / p) / dt^2 = J.((1 / p).(d\omega_r / dt)) \quad (5.50)$$

Com as condições de estudo já referidas para os circuitos eléctricos, o alternador síncrono trifásico ficará representado por vários circuitos eléctricos, ligados pelo campo magnético, e um circuito mecânico com inércia e atrito, constituindo no seu conjunto o sistema electromecânico representado na figura 5.2.

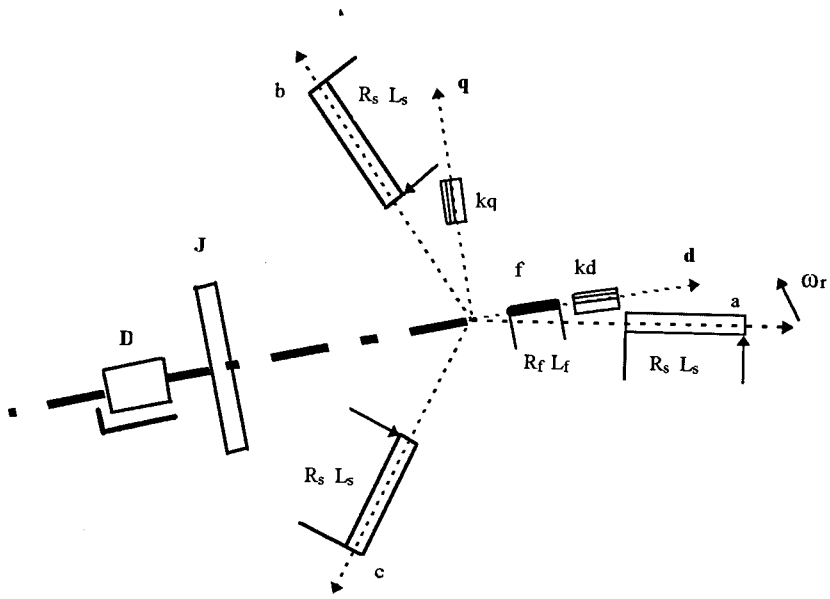


Figura 5.2 - Esquema do circuito electromecânico do alternador síncrono trifásico modelizado

A cada uma das bobinas representativas dos circuitos eléctricos está aplicada a tensão correspondente, sendo representada pelo seu valor instantâneo. Adoptando o critério de produtor para os circuitos estatóricos, e o de consumidor para os circuitos rotóricos e que $u_{kd} = u_{kq} = 0$, as tensões podem ser escritas sobre a forma de um vector de tensões eléctricas instantâneas $[u]$:

$$[u] = [-u_a, -u_b, -u_c, u_{kd}, u_{kq}]^t \qquad (5.51)$$

Da mesma maneira, as intensidades de corrente podem ser escritas considerando o vector $[i]$:

$$[i] = [-i_a, -i_b, -i_c, i_{kd}, i_{kq}]^t \qquad (5.52)$$

As intensidades de correntes estão representadas pelo seu valor instantâneo.

A equação magnética para o alternador síncrono trifásico será da forma:

$$[\psi] = [L].[i] \qquad (5.53)$$

em que $[\psi]$ será igual:

$$[\psi] = [\psi_a, \psi_b, \psi_c, \psi_f, \psi_{kd}, \psi_{kq}]^t \qquad (5.54)$$

A matriz das indutâncias $[L]$, é a matriz (5.48) e o vector $[i]$ é o vector (5.52).

Para o fluxo magnético totalizado $[\psi_a]$ da bobina estatórica **a**, contribuem os fluxos de auto-indução, incluindo o fluxo de fugas da mesma bobina:

$$\psi aa = (La + l\sigma).ia \tag{5.55}$$

o fluxo de indução mútua criado por cada uma das outras bobinas do estator:

$$\psi ab = (-La / 2).ib \tag{5.56}$$

$$\psi ac = (-La / 2).ic \tag{5.57}$$

e o fluxo de indução mútua criado por cada uma das bobinas rotóricas:

$$\psi a = (Maf.\ \cos(\alpha r)).if \tag{5.58}$$

$$\psi akd = (Makd.\ \cos(\alpha r)).ikd \tag{5.59}$$

$$\psi akq = -Makq.\ sen(\alpha r)).ikq \tag{5.60}$$

Assim, o fluxo magnético totalizado $[\psi_a]$ associado à bobine **a** é dado por:

$$\psi a = \psi aa + \psi ab + \psi ac + \psi af + \psi akd + \psi akq \tag{5.61}$$

Da mesma forma, os fluxos magnéticos totalizados $[\psi_b]$, $[\psi_c]$, $[\psi_f]$, $[\psi_{kd}]$ e $[\psi_{kq}]$ da bobinas estatóricas **b** e **c**, e das bobinas rotóricas **f**, **kd** e **kq**, e serão dados por:

$$\psi b = \psi ba + \psi bb + \psi bc + \psi bf + \psi bkd + \psi bkq \tag{5.62}$$

$$\psi c = \psi ca + \psi cb + \psi cc + \psi cf + \psi ckd + \psi ckq \tag{5.63}$$

$$\psi f = \psi fa + \psi fb + \psi fc + \psi ff + \psi fkd + \psi fkq \tag{5.64}$$

$$\psi kd = \psi kda + \psi kdb + \psi kdc + \psi kdf + \psi kdkd + \psi kdkq \qquad (5.65)$$

$$\psi kq = \psi kqa + \psi kqb + \psi kqc + \psi kqf + \psi kqkd + \psi kqkq \qquad (5.66)$$

As equações de tensões, associadas às forças electromotrizes, geradas a partir da variação do fluxo que atravessa cada bobina, podem ser escritas, uma por cada circuito eléctrico, da seguinte forma:

$$-ua = Ra.ia - ea = Ra.ia + p\psi a \qquad (5.67)$$

$$-ua = Ra.ia - ea = Ra.ia + p\psi a \qquad (5.68)$$

$$-ub = Rb.ib - eb = Rb.ib + p\psi b \qquad (5.69)$$

$$-uc = Rc.ic - ec = Rc.ic + p\psi c \qquad (5.70)$$

$$-uf = Rf.if - ef = Rf.if + p\psi f \qquad (5.71)$$

$$-ukd = Rkd.ikd - ekd = Rkd.ikd + p\psi kd \qquad (5.72)$$

De uma forma matricial:

$$[u] = [R].[i] + p[\psi] \qquad (5.73)$$

ou de forma mais desenvolvida:

$$[u] = [R].[i] + p([L].[i]) = [R].[i] + (p[L]).[i] + [L].(p[i]) = [R].[i] + \omega r[dL/d\alpha r].[i] + [L].(p[i]) \qquad (5.74)$$

Nestas expressões p representa o operador derivação em ordem ao tempo. Além das matrizes e vectores já conhecidos, deve referir-se a presença da força electromotriz dinâmica:

$$\omega r[dL/d\alpha r].[i] \qquad (5.75)$$

e da força electromotriz estática:

$$[L].p[i] \tag{5.76}$$

A potência eléctrica instantânea do alternador é dada por:

$$p(t) = [i]^t.[u] \tag{5.77}$$

Atendendo à equação (5.74):

$$p(t) = [i]^t.[R].[i] + [i]^t.\omega r[dL/d\alpha r].[i] + [i]^t.[L].(p[i]) \tag{5.78}$$

Uma parcela desta expressão corresponde à potência dissipada por efeito de joule - $[i]^t.[R].[i]$ - outra parte alimenta a variação da energia magnética armazenada na máquina, - $[i]^t.[L].(p[i]) + (1/2).\omega r.[i]^t[dL/d\alpha r].[i]$ - e a restante corresponde à potência mecânica transformada em eléctrica e que entra no estator a partir do rotor, - $(1/2).\omega r.[i]^t[dL/d\alpha r].[i]$ -. A equação electromecânica do alternador, a partir do estator será:

$$T_{el} = (1/2).\omega r.[i]^t[dL/d\alpha r].[i] \tag{5.79}$$

A expressão (5.79), tendo em conta o vector das intensidades de corrente eléctrica, após determinação da matriz $[dL/d\alpha r]$, ficará:

$$Tel = \frac{p}{2}\Sigma_{i=a,b,c}\ \Sigma_{j=f,kd,kq}\frac{dLij}{d\alpha r}..ii.ij \tag{5.80}$$

A equação que traduz a condição de equilíbrio mecânico, será a seguinte:

$$Tm = J.(1/p).(d\omega r/dt) + D.(\omega r/p) + Tel \tag{5.81}$$

As equações (5.53), (5.73) e (5.81), são as equações fundamentais do alternador síncrono trifásico, em coordenadas de fase, constituindo um modelo matemático desta máquina eléctrica.

5.3 - Modelo utilizado pelo EMTP [7]

A figura 5.3 representa o esquema do circuito eléctrico do alternador síncrono trifásico de acordo com o modelo utilizado pelo programa EMTP.

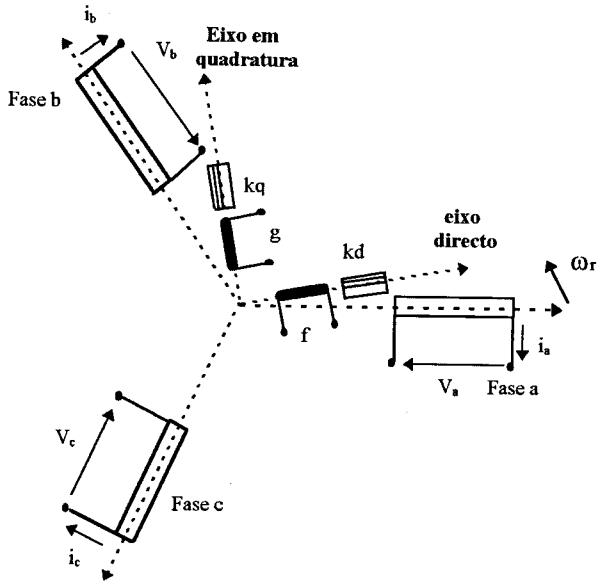


Figura 5.3 - Esquema do circuito eléctrico do alternador síncrono trifásico modelizado no EMTP

A parte eléctrica do modelo da máquina síncrona trifásica, tem os seguintes enrolamentos:

- três enrolamentos estatóricos a, b, e c, um por fase, ligados à rede de energia eléctrica. Os enrolamentos encontram-se esfazados entre si de 120 graus eléctricos;

- um enrolamento de campo indutor, cujo fluxo é produzido no eixo directo;

- um enrolamento fictício kd colocado no eixo directo, representando o efeito de amortecimento;

- um enrolamento fictício g colocado no eixo em quadratura, representando o efeito das correntes parasitas (*eddy-currents*);

- um enrolamento fictício kq colocado no eixo em quadratura, representando o efeito de amortecimento.

Os enrolamentos estatóricos são assumidos como tendo a ligação em estrela, com um possível ramo R-L ligado entre o neutro e a terra local. Contudo, também é possível utilizar, numa

simulação, a ligação dos enrolamentos estatóricos em triângulo, carecendo de uma análise cuidada da secção "DELTA CONNECTION" do manual de utilização do EMTP.

A parte eléctrica é representada por dois sistemas de equações. O primeiro sistema é constituído pelas equações de tensão:

$$[v] = -[R].[i] - \frac{d}{dt}[\psi] \tag{5.82}$$

em que:

$$[v] = [v_a, v_b, v_c, -v_f, 0, 0, 0]^t \tag{5.83}$$

$$[R] = \mathrm{diag}[R_a, R_a, R_a, -R_f, R_{kd}, R_g, R_{kq}] \tag{5.84}$$

$$[i] = [i_a, i_b, i_c, i_f, i_{kd}, i_g, i_{kq}]^t \tag{5.85}$$

$$[\psi] = [\psi_a, \psi_b, \psi_c, \psi_f, \psi_{kd}, \psi_g, \psi_{kq}]^t \tag{5.86}$$

Na expressão (5.83), os últimos três elementos são nulos porque os enrolamentos k_d, g e k_q estão em curto-circuito.

O segundo sistema é constituído pelas equações da relação fluxo-intensidades de corrente:

$$[\psi] = [L].[i] \tag{5.87}$$

O sistema mecânico é assumido como linear, e representado pela seguinte equação de equilíbrio:

$$[J]\frac{d^2}{dt^2}[\theta] + [D]\frac{d}{dt}[\theta] + [K][\theta] = [T_{turbine}] - [T_{gen/exc}] \tag{5.88}$$

Nesta equação:

$$\frac{d}{dt}[\theta]=[\omega]$$

$[\theta]$ - Vector de posição angular;

$[\omega]$ - Vector da velocidade angular;

$[J]$ - Matriz diagonal dos momentos de inércia;

$[D]$ - Matriz dos coeficientes de amortecimento;

$[K]$ - Matriz dos coeficientes de reposição (habitualmente desprezados);

$[T_{turbine}]$ - Vector dos momentos aplicados à turbina;

$[T_{gen\,/\,exc}]$ - Vector dos momentos electromagnéticos do gerador e excitação.

5.4 - Formato dos dados

Os dados de entrada têm a seguinte estrutura:

- Definição do estado inicial e ligação à rede eléctrica;
- Parâmetros especiais (opcionais);
- Parâmetros eléctricos;
- Parâmetros mecânicos;
- Definição de resultados.

5.4.1 - Definição do estado inicial e ligação à rede eléctrica

O formato dos dados, definindo os nós de ligação à rede eléctrica, são mostrados na tabela 5.1.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
5 9	BUS		VOLTS	FREQ	ANGLE		
	A6	X	E10.6	E10.6	E10.6		

Tabela 5.1 - Formato dos dados definindo os nós de ligação à rede eléctrica

Os parâmetros são:

Nas primeiras duas colunas é colocado o código "59" associado a máquinas síncronas;

BUS: Nome dos nós, um por fase e por linha, de ligação do estator à rede;

VOLT: Valor da tensão de pico no início da simulação nos terminais da máquina;

FREQ: Frequência eléctrica do gerador no início da simulação, em Hz;

ANGLE: Ângulo entre os fasores de tensão nos terminais da máquina. É assumida a sequência positiva convencional.

5.4.2 - Parâmetros especiais (opcionais)

O segundo grupo de dados define parâmetros associados a tolerâncias e distinção de dados e ligação em estrela. O formato dos parâmetros associados às tolerâncias é mostrado na tabela 5.2.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
TOLERANCES	E10.0	E10.0	E10.0	10.x	E10.2		
	EPSUBA	EPOMEG	EPDGEL		NIOMAX		

Tabela 5.2 - Formato da linha definindo os parâmetros associados a tolerâncias

Os parâmetros são:

EPSUBA: Relação entre as resistências de amortecimento (*damping resistors*) e as resistências do modelo (*resistive models*) e os elementos indutivos em paralelo com

essas resistências. Ficando vazio, o valor de defeito será 100. Para casos de instabilidade numérica é recomendado um valor entre 20 e 50;

EPOMEG: Tolerância associada ao cálculo iterativo da velocidade do rotor da máquina síncrona no período de simulação. O cálculo é assumido como falhado quando a correção da velocidade relativa é superior à tolerância, depois de ultrapassado o número máximo de iterações definidas na campo NIOMAX;

EPDGEL: Tolerância associada ao cálculo iterativo da velocidade do rotor da máquina síncrona no período de simulação. O cálculo é assumido como tendo convergido quando a correcção da velocidade relativa é inferior à tolerância. Se a correcção da velocidade relativa é maior do que esta tolerância mas menor que a tolerância EPOMEG, a solução é assumida como tendo convergido marginalmente e é impressa uma informação de aviso;

NIOMAX: Número máximo de iterações para o cálculo da velocidade do rotor da máquina síncrona. O valor de defeito é 10.

A tabela 5.3 mostra o formato dos parâmetros de distinção de dados:

PARAMETER FITTING	7.x	E8.0
		FM

Tabela 5.3 - Formato da linha definindo os parâmetros de distinção de dados

A linha de dados "PARAMETER FITTING" é usado para realizar a distinção de diferentes tipos de dados. A presença desta linha, significa a utilização de dados de fabricante enquanto a ausência desta linha indica o uso de parâmetros internos incluídos no próprio programa.

A tabela 5.4, mostra a linha que é necessário incluir, quando se pretende ligar o estator em triângulo.

DELTA CONNECTION

Tabela 5.4 - Formato da linha definindo a ligação em triângulo do estator

Na ausência da linha de dados anterior, é assumido que o estator se encontra ligado em estrela, sendo esta situação mais comum nos grandes sistemas de produção de energia eléctrica.

5.4.3 - Parâmetros eléctricos

A primeira linha de dados de parâmetros eléctricos é apresentada na tabela 5.5.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10					11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40	41 42 43 44 45 46 47 48 49 50	51 52 53 54 55 56 57 58 59 60	61 62 63 64 65 66 67 68 69 70	71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
NUMAS	KMAC	KEXC	MECHUN	NP	SMOVTP	SMOVTQ	RMVA	RKV	AGLINE	S1D	S2D
I2	I3	I4	I1	I4	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6

Tabela 5.5 - Formato da primeira linha de parâmetros eléctricos

Os parâmetros são:

NUMAS: Número de massas ligadas ao sistema da chumaceira do veio (*shaft system*) do gerador;

KMAC: Número de massas (*masses*) correspondentes ao rotor do gerador;

KEXC: Número de massas (*masses*) correspondentes à excitação do sistema da chumaceira do veio (*exciter on the shaft system*);

MECHUN: Flag usada para distinguir o tipo de unidades dos parâmetros mecânicos fornecidos. Valor zero ou vazio - unidades inglesas, valor um - unidades métricas do sistema SI;

NP: Número de pólos que caracteriza o rotor da máquina;

SMOVTP: Factor proporcional que é usado para dividir a potência activa pelos vários geradores existentes na fase inicial da simulação. Se só existir um gerador este campo é ignorado;

SMOVTQ: Este campo é idêntico ao campo SMOVTP, sendo agora referido à potência reactiva;

RMVA: Potência aparente total trifásica em MVA;

RKV: Tensão composta da máquina em kV (RMS);

AGLINE: Valor da intensidade de corrente indutora, em Ampere, que permite obter o valor de tensão nominal (1 p.u.) utilizando a curva de saturação da máquina (eixo directo). É a especificação indirecta da indutância mútua entre o campo e o estator da

máquina. Se o campo magnético tiver saturação, este valor deverá ser indicado como negativo;

S1D: Valor da intensidade de corrente indutora, em Ampere, que permite obter o valor de tensão AD1 (em p.u.) utilizando a curva de saturação da máquina. Se o campo magnético não tem saturação, este campo deverá ser colocado vazio;

S2D: Valor da intensidade de corrente indutora, em Ampere, que permite obter o valor de tensão AD2 (em p.u.) utilizando a curva de saturação da máquina. Se o campo magnético não tem saturação, este campo deverá ser colocado vazio;

A segunda linha de dados de parâmetros eléctricos é mostrada na tabela 5.6.

	AD1	AD2	AQ1	AQ2	AGLQ	S1Q	S2Q
	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6

Tabela 5.6 - Formato da segunda linha de parâmetros eléctricos

É só descrito o único parâmetro usado no exemplo 7:

AGLQ: Valor da intensidade de corrente indutora, em Ampere, que permite obter o valor de tensão nominal (1 p.u.) utilizando a curva de saturação da máquina. É a especificação indirecta da indutância mútua entre o campo e o estator da máquina. Se a saturação não for considerada, colocar o valor deste campo negativo.

A terceira linha de dados de parâmetros eléctricos é mostrada na tabela 5.7.

RA	XL	XD	XQ	XDD	XQQ	XDDD	XQQQ
E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6

Tabela 5.7 - Formato da terceira linha de parâmetros eléctricos

Os parâmetros são:

RA: Resistência do estator, em p.u.;

XL: Reactância de fugas do estator, em p.u.;

XD: Reactância síncrona do eixo directo (eixo d), em p.u.;

XQ: Reactância síncrona do eixo em quadratura (eixo q), em p.u.;

XDD: Reactância transitória do eixo directo (eixo d), em p.u.;

XQQ: Reactância transitória do eixo em quadratura (eixo q), em p.u.;

XDDD: Reactância sub-transitória do eixo directo (eixo d), em p.u.;

XQQQ: Reactância sub-transitória do eixo em quadratura (eixo q), em p.u.;

TDOP: Constante de tempo transitória em circuito aberto do eixo directo (em s);

TQOP: Constante de tempo transitória em circuito aberto do eixo em quadratura (em s);

TDOPP: Constante de tempo sub-transitória em circuito aberto do eixo directo (em s);

TQOPP: Constante de tempo sub-transitória em circuito aberto do eixo em quadratura (em s);

XO: Reactância homopolar em p.u.;

RN: Parte real da impedância do neutro em p.u.;

XN: Parte imaginária da impedância de neutro em p.u.;

5.4.4 - Parâmetros mecânicos

Os parâmetros mecânicos são apresentados na tabela 5.8.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	2 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	3 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	4 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	5 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	6 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	7 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	8 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
M L		EXTRS	HICO	DSR	DSM	HSP	DSD	
I 2		E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	E10.6	

Tabela 5.8 - Formato da linha de parâmetros mecânicos

Os parâmetros são:

ML: Número de massa existente no sistema mecânico. Estas massas são numeradas sequencialmente de 1 até ao sistema da chumaceira do veio do gerador;

EXTRS: Fracção do binário mecânico total associado à massa "ML";

HICO: Momento de inércia da massa "ML" (milhões de kg.m^2 se MECHUN =1);

DSR: A velocidade de desvio do coeficiente de amortecimento (*self-damping*) da massa "ML;

DSM: Coeficiente mútuo de amortecimento ((N.m)/(radianos/segundo) se MECHUN=1);

HSP: Coeficiente de reposição (*spring constant*) ((N.m)/(radianos) se MECHUN=1);

DSD: Coeficiente relacionando o binário de amortecimento associado à massa i e a velocidade de rotação respectiva;

5.5 - Exemplo 4

5.5.1 - Dados da simulação

O exemplo seguinte, simula um curto-circuito num sistema integrando dois geradores síncronos trifásicos ligados a uma rede já utilizada no exemplo 3. O esquema respectivo é apresentado na figura 5.4.

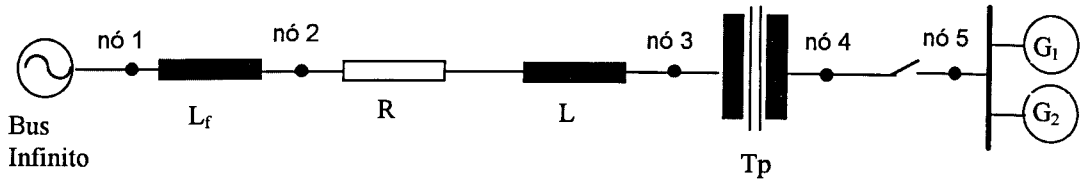


Figura 5.4 - Esquema da rede onde se vai simular um curto circuito

Os dados do exemplo4 são apresentados na listagem 5.1 e incluem:

- Todos os dados vão ser convertidos para p.u. e a potência de base será a potência de 100 MVA. A impedância de base associada à tensão de 60 kV será:

$$Z_{base(60kV)} = \frac{60^2}{100} = 36\Omega$$

- A indutância da fonte L_f (nó1-nó2), é calculada a partir da potência de curto-circuito no ponto de ligação da linha ao barramento infinito (20 GVA). A indutância equivalente da rede será:

$$X_f = \frac{1}{314} \cdot \frac{60^2}{20000} x314x36 = 0{,}1799\Omega$$

- A linha existente entre os nós 2 e 3 é representada pelo esquema em Π considerando-se os valores seguintes:

. R = 2,9988/36 = 0,0833 p.u.;

. L = 8,4010/36 = 0,2334 p.u.;

- O transformador tem as seguintes características:

. ligação em Y Δ, tensões 60/13,8 kV ;

. a impedância de base do secundário irá ser:

$$Z_{base(S)} = \frac{13{,}8^2}{100} = 1{,}9\Omega$$

$$X_P = \frac{0{,}08}{2} x36x3 = 4{,}32\Omega$$

$$Z_S = \frac{0{,}08}{2} x1{,}9 = 5{,}4\Omega$$

- O gerador do barramento infinito será:

. A amplitude $E = \frac{60}{\sqrt{3}} . \sqrt{2} = 48{,}990$ kV (tensão simples máxima);

- A frequência igual a 50 Hz;

- As fases:

. fase A - a fase da tensão é "0";

. fase B - a fase da tensão é "-120";

. fase C - a fase da tensão é "-240".

- Os dados do gerador 1 são:

. S=90 MVA;

- 8 pólos;

- 13,8 kV;

- 50 Hz

- 280 A (intensidade de corrente indutora).

- R_a= 0,038 p.u.;

- X_d= 1,200 p.u.;

- X_d' = 0,350 p.u.;

- X_d'' = 0,250 p.u.;

- τ_{do}' = 6,240 seg;

- τ_{do}'' = 0,032seg;

- X_o= 0,150 p.u.;

- X_l= 0,220 p.u.;

- X_q= 0,700 p.u.;

- X_q'' = 0,230 p.u.;

- τ_{qo}'' = 0,060 seg;

- Constante de inércia H = 4,5 Seg.

- Os dados do gerador 2 são:

. S=76 MVA;

- 8 pólos;

- 13,8 kV;

- 50 Hz

- 250 A (intensidade de corrente indutora).

- R_a = 0,004 p.u.;

- X_d = 1,150 p.u.;

- X_d' = 0,310 p.u.;

- X_d'' = 0,210 p.u.;

- τ_{do}' = 5,850 seg;

- τ_{do}'' = 0,036 seg;

- X_o = 0,132 p.u.;

- X_1 = 0,175 p.u.;

- X_q = 0,685 p.u.;

- X_q'' = 0,182 p.u.;

- τ_{qo}'' = 0,073 seg;

- Constante de inércia H = 5,7 Seg.

Os enrolamentos do estator dos geradores estão ligados em estrela cujo ponto neutro está ligado rigidamente à terra.

As perdas do transformador e o valor das reactâncias são colocadas em p.u. com a base de potência igual à potência do gerador.

O barramento de potência infinita tem um valor de tensão igual a 1,00 p.u., sendo a tensão de base igual a 500 kV, e um ângulo de fase de 0,0 graus.

A tensão dos geradores é 1,04 p.u., sendo a tensão de base de 13,8 kV, e um ângulo de 0,0 graus.

As potências activas e reactivas produzidas serão respectivamente 0,55 e 0,45 da potência instaladas nos dois geradores.

O ficheiro com os dados de entrada do exemplo4 são apresentados na listagem 5.1.

```
Ln  PROGRAMA
1   BEGIN NEW DATA CASE
2   C Ficheiro - EXEMPLO4.DAT
3   C
4   POWER FREQUENCY, 50
5   C
6   C Definição de dados gerais reais
7   C
8   C DELTAT     TMAX     XOPT     COPT   EPSILN   TOLMAT   TSTART
9   0.000277   0.100     50.0     50.0
10  C
11  C Definição de dados gerais inteiros
12  C
13  C    IOUT    IPLOT   IDOUBL   KSSOUT   MAXOUT     IPUN   MEMSAV     ICAT   NENERG   IPRSUP
14          1        1                                    0
15  C
16  C Definição de dados dos ramos
17  C
18  C Impedancia da fonte
19  C
20  C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R      L      C
21    NO1A   NO2A                     6.180
22    NO1B   NO2B                     6.180
23    NO1C   NO2C                     6.180
24  C
25  C Linha em equivalente PI (sem acoplamentos)
26  C
27  C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R      L      C      R      L      C      R      L      C
28    USE RL
29   1NO2A   NO3A                0.08330.2334      0
30   2NO2B   NO3B                                     0.08330.2334      0
31   3NO2C   NO3C                                                        0.08330.2334      0
32  C
33  C Transformador
34  C
35    TRANSFORMER                           TRAN A
36  9999
37   1NO3A                           4.320   34.68
38   2NO4A   NO4C                    0.076   13.80
39    TRANSFORMER TRAN A                    TRAN B
40   1NO3B
41   2NO4B   NO4A
42    TRANSFORMER TRAN A                    TRAN C
43   1NO3C
44   2NO4C NO4B
45  C ----- Connectivity capacitors
46    NO5A                                   1.0
47    NO5B                                   1.0
48    NO5C                                   1.0
49  BLANK CARD ENDING BRANCH DATA.
50  C Definição dos dados dos interruptores
51  C
52  C Interruptor principal
53  C
54  C BUS1   BUS2        TCLOSE      TOPEN        IE
55    NO4A   NO5A          -1.0        1.1       0.0                                          1
```

Listagem 5.1 - Ficheiro (exemplo4.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores

```
  NO4B   NO5B          -1.0          1.1          0.0                                                  1
  NO4C   NO5C          -1.0          1.1          0.0                                                  1
C
C Interruptor que cria o curto-circuito
C
C BUS1   BUS2        TCLOSE       TOPEN          IE
  NO5A               40.E-3         1.0          0.0                                                  1
BLANK CARD ENDING SWITCH DATA.
C
C ----- Infinite bus voltages
C
14NO1A       489897     50.0          0.0                                        -1.0
14NO1B       489897     50.0       -120.0                                        -1.0
14NO1C       489897     50.0        120.0                                        -1.0
C
C ----- Synchronous machine specifications
C
59NO5A     11718.36     50.0         34.0
  NO5B
  NO5C
C ----- First generator
PARAMETER FITTING          2.0
C --- Machine ratings
 1 1      8       0.55       0.55       90.0       13.8       280.0
BLANK CARD - NO SATURATION MODELING
C --- Machine parameters - manufacturer's data
 0.038      0.220      1.200      0.700      0.350      0.700      0.250      0.230
 6.240                 0.032      0.060      0.150
C --- Mechanical system data
 1          1.0        3.116092
BLANK CARD ENDING MASS CARDS
C --- Output data request
BLANK CARD ENDING OUTPUT REQUEST
  FINISH PART
C ----- Second generator
PARAMETER FITTING          2.0
C --- Machine ratings
 1 1      8       0.45       0.45       76.0       13.8       250.0
BLANK CARD - NO SATURATION MODELING
C --- Machine parameters - manufacturer's data
 0.004      0.175      1.150      0.685      0.310      0.685      0.210      0.182
 5.850                 0.036      0.073      0.132
C --- Mechanical system data
 1          1.0        3.333065
BLANK CARD ENDING MASS CARDS
C --- Output data request
BLANK CARD ENDING OUTPUT REQUEST
  FINISH
BLANK CARD ENDING SOURCE DATA.
C ----- Node voltage output request
  NO4A   NO4B   NO4C
BLANK CARD ENDING SELECTIVE NODE VOLTAGE OUTPUT REQUEST.
  PRINTER PLOT
BLANK CARD ENDING PLOT REQUEST.
```

Listagem 5.1 - Ficheiro (exemplo4.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (continuação)

5.5.2 - Resultados da simulação

Na listagem 5.2 (anexo D), encontram-se os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores.

O gráfico apresentado na figura 5.5 mostra a evolução temporal das tensões nos nós 4A, 4B e 4C, correspondente ao interruptor de ligação do barramento dos geradores e do transformador.

As ondas antes do defeito são sinusóides corrompidas por sinais de frequência mais elevada. O defeito introduzido em (time=40 ms), curto circuito entre o nó 5A e a terra, provoca a anulação da tensão 4A. Nas fases sem defeito verificam-se distorções e um abaixamento do valor máximo das ondas.

A figura 5.6 apresenta o andamento das ondas de intensidade de corrente nos ramos 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C e 5A-terra, podendo-se identificar um primeiro período antes do defeito, com as ondas perfeitas com excepção da intensidade de corrente no ramo 5A-terra que é nula. Com a introdução do defeito (time=40 ms) inicia-se um segundo período verificando-se que a contribuição do transformador (ramos 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C) é diminuta. A intensidade de corrente 5A-terra atinge valores elevados devido à contribuição dos geradores.

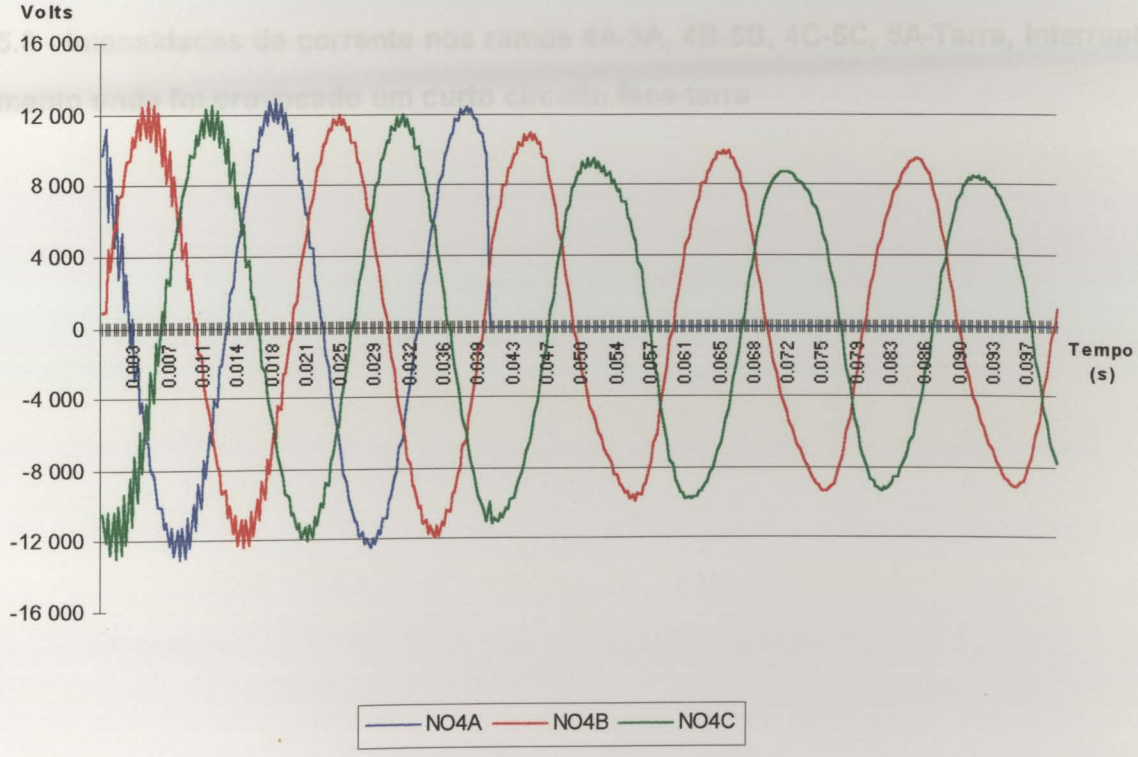


Figura 5.5 - Tensões nos nós 4A, 4B e 4C barramento comum a dois geradores síncronos trifásicos

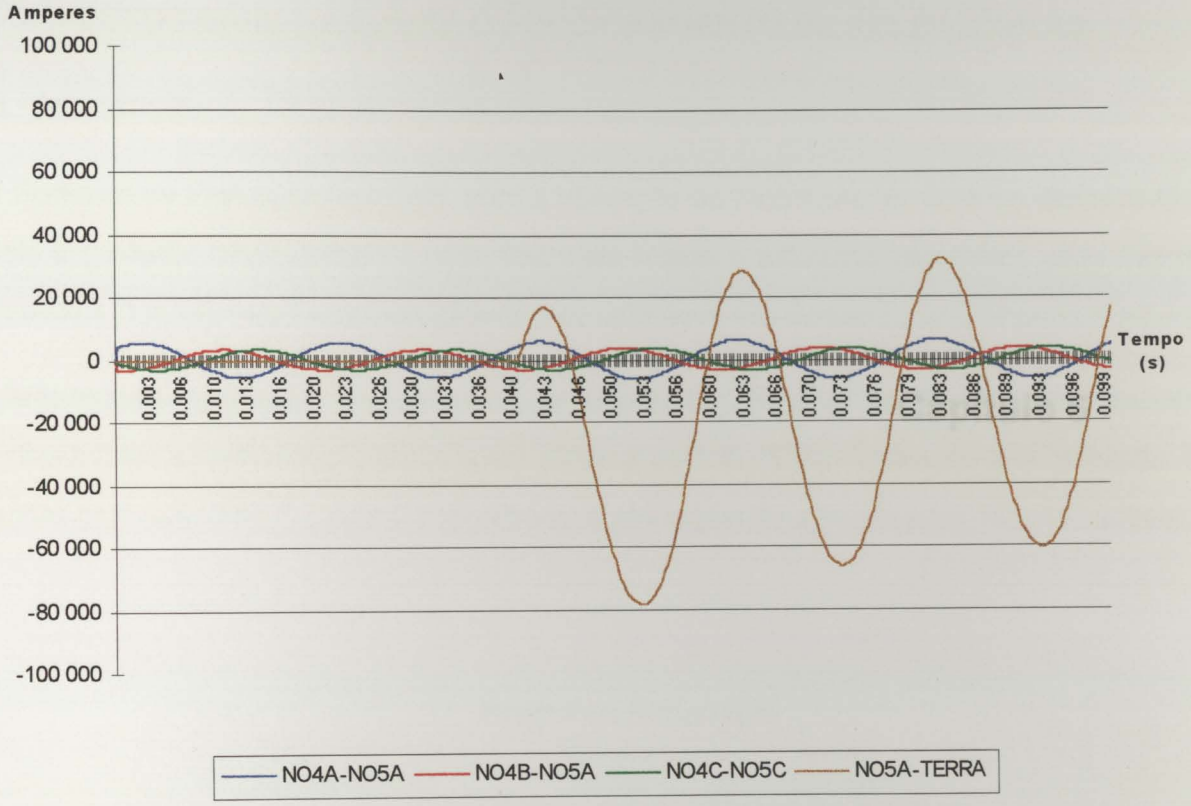


Figura 5.6 - Intensidades de corrente nos ramos 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C, 5A-Terra, interruptor e barramento onde foi provocado um curto circuito fase-terra

Capítulo 6

Aspectos Básicos sobre o Funcionamento de Relés Digitais

6 - ASPECTOS BÁSICOS SOBRE O FUNCIONAMENTO DE RELÉS DIGITAIS

6.1 - Introdução

Os Sistemas de Protecção dos SEE, com a utilização de modernas técnicas de digitalização de sinais e posterior processamento cada vez mais rápido e utilizando algoritmos cada vez mais complexos [1 e 13], estão a evoluir iniciando-se uma nova era denominada *Computer Relaying*.

A arquitectura associada ao conceito de *Computer Reaying* baseia-se em subsistemas localizados em subestações, ligados a um sistema central de monitorização e surpervisão, com funções bem definidas. A figura 6.1 representa a hierarquia de equipamento de uma subestação.

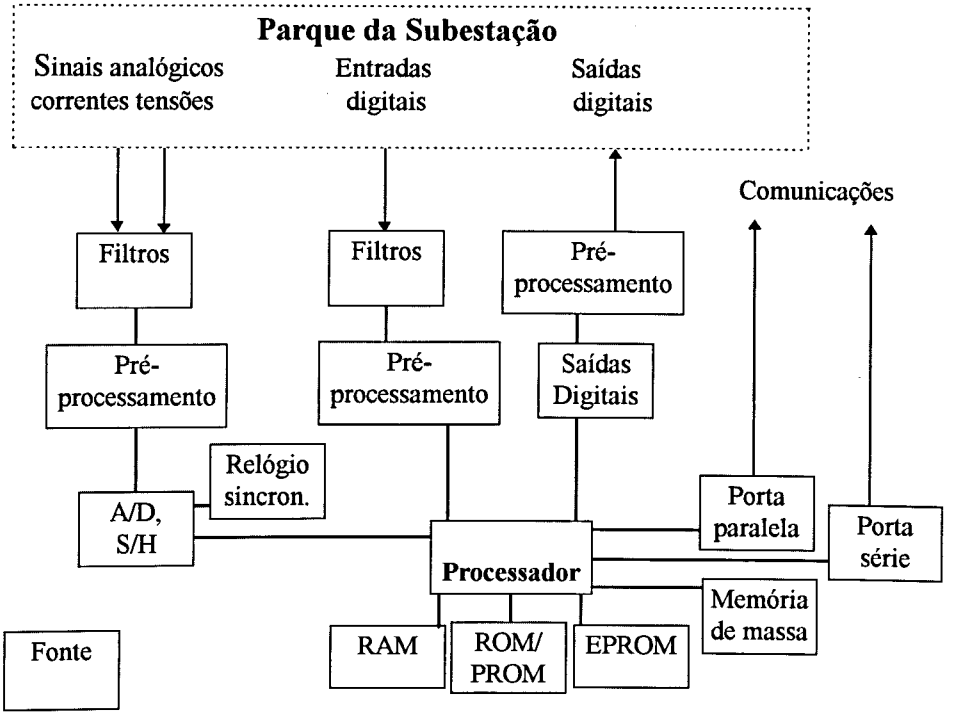


Figura 6.1 - Hierarquia de equipamento numa subestação

No processador central realiza-se a gestão de todo o processo. Nele estão constantemente a correr funções associadas a algoritmos que representam o funcionamento de relés digitais e, ao mesmo tempo, funções que controlam as comunicações com o equipamento periférico.

6.2 - Constituição do relé digital

A constituição de um relé digital é representada de forma esquemática na figura 6.2.

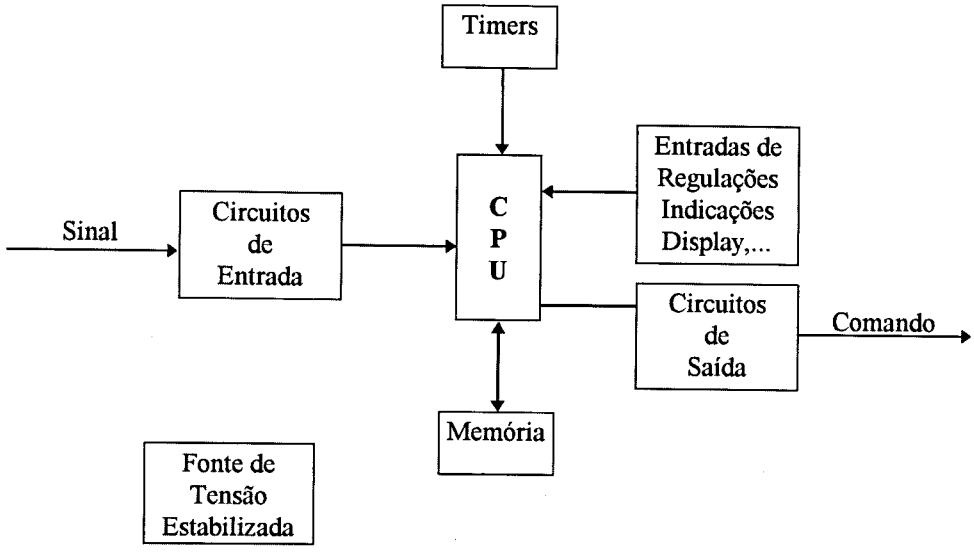


Figura 6.2 - Constituição de um relé digital

O CPU (microprocessador), controla todo o processo de um relé digital, ou seja, constantemente está a correr o algoritmo com as funções de protecção e executa outras tarefas de controle de periféricos.

6.3 - Algoritmos baseados na forma de onda

6.3.1 - Considerações gerais

De acordo com [1], consideremos um sinal $y(t)$ representado pela equação (6.1).

$$y(t) = Y_c.\cos\omega_0 t + Y_s.\operatorname{sen}\omega_0 t \qquad (6.1)$$

Nesta equação Y_c e Y_s, são números reais. Com amostras obtidas nos instantes $-\Delta t$, 0 e $+\Delta t$ (6.2), (6.3) e (6.4) é possível estimar os valores de Y_c e Y_s.

$$y_{(k=-1)} = y_{(-\Delta t)} = Y_c.\cos\theta - Y_s.\operatorname{sen}\theta \qquad (6.2)$$

$$y_{(k=0)} = y_{(0)} = Y_c \tag{6.3}$$

$$y_{(k=+1)} = y_{(+\Delta t)} = Y_c.\cos\theta + Y_s.\mathrm{sen}\theta \tag{6.4}$$

Nestas equações θ é o esfazamento entre amostras à frequência fundamental. Esta informação pode ser reunida numa matriz, ficando então:

$$\begin{bmatrix} y_{(k=-1)} \\ y_{(k=0)} \\ y_{(k=+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\mathrm{sen}\theta \\ 1 & 0 \\ \cos\theta & \mathrm{sen}\theta \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} Y_c \\ Y_s \end{bmatrix} \tag{6.5}$$

Definindo valores para duas amostras, por exemplo para $y_{(k=0)}$ e $y_{(k=1)}$, consegue-se calcular, por substituição na matriz (6.5), os valores para Y_c e Y_s. Assim, neste caso:

$$Y_c = y_0$$

$$Y_s = (y_1 - y_0.\cos\theta) / \mathrm{sen}\theta$$

Mas se duas amostras são suficientes para calcular Y_c e Y_s, os seus valores podem não ter a qualidade requerida, pois as amostras podem estar afectadas por erros de medida, presença de harmónicos ou outros ruídos. Uma forma de ultrapassar este problema consiste na utilização de três ou mais amostras, em vez de duas, procurando obter imunidade às frequências não fundamentais.

6.3.2 - Estimação de estado

A estimação de estado, com redundância de amostras, ou seja utilizando um número de amostras superior ao numero de variáveis a calcular, baseia-se na equação (6.6) em que se assume que os erros das medidas têm valor médio nulo e que a matriz das suas covâriancias é a identidade.

$$\hat{x} = (A^T.A)^{-1}.A^T.b \tag{6.6}$$

Nesta equação:

- A: é a matriz que relaciona as grandezas cujo valor se pretende estimar com as grandezas medidas;

- b: é o vector de medidas;

Para o exemplo em análise no ponto 6.3.1, a matriz A e o vector b serão da forma:

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta \\ 1 & 0 \\ \cos\theta & \operatorname{sen}\theta \end{bmatrix} \tag{6.7}$$

$$b = \begin{bmatrix} y(k=-1) \\ y(k=0) \\ y(k=+1) \end{bmatrix} \tag{6.8}$$

Substituindo (6.7) e (6.8) na equação (6.6) obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{Y}_c \\ \hat{Y}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+2\cos^2\theta & 0 \\ 0 & 2\operatorname{sen}^2\theta \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 1 & \cos\theta \\ -\operatorname{sen}\theta & 0 & \operatorname{sen}\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y(k=-1) \\ y(k=0) \\ y(k=+1) \end{bmatrix} \tag{6.9}$$

Resolvendo a equação (6.9) obtêm-se os valores finais:

$$\hat{Y}_c = \frac{y_1.\cos\theta + y_0 + y_{-1}.\cos\theta}{1+2\cos^2\theta} \tag{6.10}$$

$$\hat{Y}_s = \frac{y_1 - y_{-1}}{2\operatorname{sen}\theta} \tag{6.11}$$

As expressões (6.10) e (6.11) são válidas para um conjunto de três amostras centradas na amostra K=0.

A amplitude do sinal $y(t)$ será dada por:

$$\left|Y^{(k)}\right| = \sqrt{(Y_c^{(k)})^2 + (Y_s^{(k)})^2} \tag{6.12}$$

A fase será dada por:

$$\varphi^{(k)} = \operatorname{arctg}\frac{Y_c^{(k)}}{Y_s^{(k)}} = \operatorname{arctg}\frac{Y_c}{Y_s} - K\theta \tag{6.13}$$

A expressão (6.13) revela que a fase é calculada correctamente a menos de uma rotação de $k\theta$ do fasor associado ao sinal amostrada. Isto é, após cada nova amostragem, o ângulo $\varphi^{(k)}$ diminui de θ. Se tal se revelar necessário, é possível corrigir o ângulo do fasor multiplicando este por $e^{jk\theta}$. No caso de se pretender obter uma impedância, o efeito de rotação dos fasores de tensão e intensidade de corrente será anulada no resultado final.

6.3.3 - Fonte de erros

A situação ideal consistia na existência, unicamente, de ondas puramente sinusoidais de tensão e intensidade de corrente à frequência fundamental. Mas, por diversas razões, à onda à frequência fundamental sobrepõem-se outros sinais.

Após um defeito, a intensidade de corrente de defeito nos terminais de um circuito constituído por uma fonte em série com uma impedância $\underline{Z} = R + j\omega_0 L$ é regida pela equação:

$$i(t) = I.\cos(\omega_0 t - \varphi) - [I.\cos(\omega_0 t - \varphi)].e^{-(t-t_0)R/L} \qquad (6.14)$$

A amplitude da componente DC e a constante de tempo vão depender:

- da distância, maior ou menor proximidade, do local de defeito em relação a geradores;
- do instante t_0 em que ocorre o defeito;
- dos componentes que constituem o circuito;
- das condições pré-defeito.

Algoritmos baseados em equações diferenciais que serão descritas em 6.4, não vêem a sua presença afectada pela presença de componentes exponenciais.

Os transformadores de corrente e tensão (TI e TT), em regime transitório, não têm uma boa resposta, distorcendo a forma de onda. Os filtros anti-aliasing são indicados para remover muitos desses sinais que têm conteúdos elevados a altas frequências. Os próprios filtros anti-aliasing são fonte de distorções, por distorcerem em regime transitório as formas de onda.

Os arcos eléctricos criados quando da separação dos pólos de disjuntores ou mesmo os arcos associados aos defeitos, têm um comportamento não linear, podendo produzir componentes harmónicas.

Além de todos estes aspectos, os componentes do próprio SEE são uma fonte de sinais a frequências diferentes da fundamental. As capacidades de uma linha longa, após um defeito, provocam a distorção da onda, agravando-se este facto para escalões de tensão mais elevados e para defeitos localizados muito próximos do início da linha.

6.3.4 - Protecção utilizando estimativa de parâmetros

Consideremos um sinal genérico a ser amostrado cuja expressão é apresentada em seguida:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{N} Y_n . S_n(t) + \varepsilon(t) \qquad (6.15)$$

ou, considerando um intervalo entre amostras Δt:

$$y_k = \sum_{n=1}^{N} Y_n . S_n(k\Delta t) + \varepsilon(t) \qquad (6.16)$$

Nestas expressões:

$$\left.\begin{array}{l} S_1(t) = \cos\omega_0 t \\ \\ S_2(t) = \operatorname{sen}\omega_0 t \end{array}\right] \text{componente fundamental}$$

$$\left.\begin{array}{l} S_3(t) = \cos 2\omega_0 t \\ \\ S_4(t) = \operatorname{sen} 2\omega_0 t \end{array}\right] 2^{\circ} \text{ harmónico}$$

$$\left.\begin{array}{c} . \\ \\ \end{array}\right] \text{outros harmónicos}$$

$$S_n(t) = e^{-(R/L)t} \qquad \text{Componente DC}$$

A partir das medidas y_k podem ser estimados os coeficientes Y_n. Os valores amostrados nos instantes $k\Delta t$ podem ser organizados de forma matricial obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ . \\ . \\ . \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(\Delta t) \ldots\ldots\ldots S_2(\Delta t) \ldots\ldots\ldots S_N(\Delta t) \\ S_1(2\Delta t) \ldots\ldots\ldots S_2(2\Delta t) \ldots\ldots\ldots S_N(2\Delta t) \\ . \quad . \quad . \\ . \quad . \quad . \\ . \quad . \quad . \\ S_1(k\Delta t) \ldots\ldots\ldots_2(k\Delta t) \ldots\ldots\ldots S_N(k\Delta t) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ . \\ . \\ . \\ Y_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ . \\ . \\ . \\ \varepsilon_k \end{bmatrix} \qquad (6.17)$$

onde k representa o número de medidas e N o número de parâmetros a estimar sendo $k>>N$.

Consideremos que os erros das medidas têm valor médio nulo, ou seja:

$$E(\varepsilon) = 0 \qquad (6.18)$$

e que W é a sua matriz de covariâncias

$$E(\varepsilon.\varepsilon^T) = W \qquad (6.19)$$

Então utilizando um processo de estimação de estado obtém-se (6.20). Nesta expressão S representa a matriz de dimensão KxN presente em (6.17).

$$\hat{Y} = (S^T.W^{-1}S)^{-1}.S^T W^{-1}.y \qquad (6.20)$$

Igualando a matriz de covariâncias à matriz identidade $W=I$, já que os erros são usualmente considerados não correlacionados e independentes, amostra a amostra, e têm uma covariância constante, obtém-se finalmente a expressão (6.21):

$$\hat{Y} = (S^T.S)^{-1}.S^T.y \qquad (6.21)$$

6.3.5 - Algoritmo utilizando a Transformada discreta de Fourier (DFT)

Consideremos que o sinal a amostrar inclui, apenas, termos à frequência fundamental e harmónicos. Se necessário a componente DC foi previamente eliminada através de um filtro. Consideremos, ainda, que o sinal referido é amostrado tendo sido realizado um número par de amostras por ciclo. Nestas condições, a expressão (6.21) corresponde à forma rectangular da Transformada discreta de Fourier (DFT). Usando a ortogonalidade dos termos seno e coseno:

$$\begin{aligned}(S^T.S)_{ij} &= \sum_{k=1}^{K} s_i(k\Delta t)s_j(k\Delta t) \\ &= K/2; i = j \\ &= 0;\ \ i \neq j\end{aligned} \tag{6.22}$$

A componente fundamental é obtida pelas expressões (6.23) e (6.24):

$$\hat{Y}_c = \frac{2}{K}\sum_{k=1}^{K} y_k.\cos(k\theta) \tag{6.23}$$

$$\hat{Y}_s = \frac{2}{K}\sum_{k=1}^{K} y_k.\mathrm{sen}(k\theta) \tag{6.24}$$

enquanto que os harmónicos de ordem p serão dados pelas expressões (6.25) e (6.26):

$$\hat{Y}_c^{(p)} = \frac{2}{K}\sum_{k=1}^{K} y_k.\cos(pk\theta) \tag{6.25}$$

$$\hat{Y}_s^{(p)} = \frac{2}{K}\sum_{k=1}^{K} y_k.\mathrm{sen}(pk\theta) \tag{6.26}$$

Realizando K amostras por ciclo, o esfazamento entre amostras corresponde ao ângulo θ, sendo $\theta = 2\pi/K$.

Os coeficientes estimados, utilizando K amostras por ciclo, estão limitados a $k/2-1$ harmónicos. Esta situação é explicada pelo teorema de Amostragem de Nyquist. Sendo ω_m a maior frequência do sinal a amostrar, e ω_0 a frequência dos impulsos de amostragem, deverá verificar-se que $\omega_0 > 2\omega_m$ para ser possível recuperar o sinal. Ao realizar a amostragem, é produzido no domínio das frequências um conjunto de réplicas do sinal original, que não se devem sobrepôr para ser possível recuperar o sinal. Esta situação, é particularmente importante para protecções

de transformadores pois, neste caso, pode ser necessário conhecer o valor de algum harmónicos.

Os algoritmos utilizando a DFT de ciclo completo eliminam a componente DC e os harmónicos de ordem par e impar. A componente fundamental passa integralmente sendo necessário um ciclo completo para ser possível calcular a 1ª estimativa de valores de $Y_c^{(p)}$ e $Y_s^{(p)}$. Se a janela for menor de que um ciclo, por exemplo, meio ciclo, a componente DC e os harmónicos de ordem par não serão nulos.

Se um algoritmo utilizar as expressões (6.23) e (6.24), são realizados mais cálculos do que realmente se necessita na prática. As formas recursivas dos algoritmos de Fourier solucionam este problema. Para uma janela terminando na amostra L a expressão será:

$$Y^{(L)} = \frac{2}{K} \sum_{k=L-K+1}^{L} y_k e^{-j(k+K-L).\theta} \qquad (6.27)$$

Multiplicando $Y^{(L)}$ por $e^{j(K-L).\theta}$ obtém-se um resultado estacionário:

$$\tilde{Y}^{(L)} = \frac{2}{K} \sum_{k=L-K+1}^{L} y_k e^{-jk\theta} \qquad (6.28)$$

$$\tilde{Y}^{(L-1)} = \frac{2}{K} \sum_{k=L-K}^{L-1} y_k e^{-jk\theta} \qquad (6.29)$$

As duas últimas expressões não são iguais, porque o último termo da expressão (6.28) não existe em (6.29) e o primeiro termo da expressão (6.29) não existe em (6.28), isto é:

$$\tilde{Y}^{(L)} = \tilde{Y}^{(L-1)} + \frac{2}{K}\left[y_L e^{-jL.\theta} - y_{L-K} e^{-j.(L-K)\theta}\right] \qquad (6.30)$$

ou

$$\tilde{Y}^{(L)} = \tilde{Y}^{(L-1)} + \frac{2}{K}\left[y_L - y_{L-K} e^{jK\theta}\right] e^{-jL\theta} \qquad (6.31)$$

A equação (6.31) é válida para uma janela de comprimento K. Para a janela correspondente a um ciclo completo, algoritmo de Fourier de ciclo completo, $K\theta = 2\pi$ e a expressão (6.31) ficará:

$$\tilde{Y}_c^{novo} = \tilde{Y}_c^{antigo} + \frac{2}{K}\left[y_{novo} - y_{antigo}\right].\cos(L\theta) \qquad (6.32)$$

$$\tilde{Y}_s^{novo} = \tilde{Y}_s^{antigo} + \frac{2}{K}\left[y_{novo} - y_{antigo}\right].\mathrm{sen}(L\theta) \qquad (6.33)$$

onde y_{novo} é a nova amostra e y_{antiga} é a amostra mais antiga, ou se se pretender, é a última amostra incluída no ciclo completo anterior.

Para a janela de meio ciclo $K\theta = \pi$, as expressões serão:

$$\tilde{Y}_c^{novo} = \tilde{Y}_c^{antigo} + \frac{2}{K}\left[y_{novo} + y_{antigo}\right].\cos(L\theta) \qquad (6.34)$$

$$\tilde{Y}_s^{novo} = \tilde{Y}_s^{antigo} + \frac{2}{K}\left[y_{novo} + y_{antigo}\right].\mathrm{sen}(L\theta) \qquad (6.35)$$

Para actualizar uma estimativa, só é necessário efectuar uma subtração, um produto e uma adição, sendo esta a grande vantagem deste algoritmo. Se o sinal a amostrar tem apenas a componente fundamental, no algoritmo de Fourier de ciclo completo, então $y_{novo} = y_{antigo}$ implicando que as estimativas de $\tilde{Y}_c$ e $\tilde{Y}_s$ não se alteram.

6.4 - Algoritmo baseados em modelos do sistema de energia

6.4.1 - Aspectos básicos

Os algoritmos utilizando equações diferenciais baseiam-se no modelo do sistema de energia, enquanto que os algoritmos descritos em 6.2.5 se baseiam na análise da forma de onda.

O esquema do modelo da linha com defeito é apresentado na figura 6.3. A equação diferencial que relaciona a tensão e a intensidade de corrente vistos pelo relé será:

$$v(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \qquad (6.36)$$

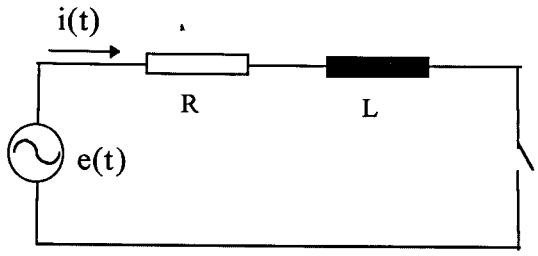


Figura 6.3 - Modelo da linha com defeito

Conhecendo medidas de $v(t)$ e $i(t)$ será possível estimar os parâmetros R e L, bem como a distância do relé ao local de defeito.

Integrando a equação (6.36) em dois intervalos consecutivos $[t_o, t_1]$ e $[t_1, t_2]$ obtêm-se:

$$\int_{t_o}^{t_1} v(t).dt = R\int_{t_o}^{t_1} i(t).dt + L[i(t_1) - i(t_o)] \tag{6.37}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} v(t).dt = R\int_{t_1}^{t_2} i.(t)dt + L[i(t_2) - i(t_1)] \tag{6.38}$$

Os integrais (6.37) e (6.38) podem ser calculados de forma aproximada utilizando os valores das amostras. Considerando que as amostras se encontram igualmente espaçadas de Δt e utilizando a regra dos trapézios obtêm-se:

$$\int_{t_o}^{t_1} v(t).dt = \frac{\Delta t}{2}.[v(t_1) + v(t_o)] \tag{6.39}$$

$$\int_{t_o}^{t_1} i(t).dt = \frac{\Delta t}{2}.[i(t_1) + i(t_o)] \tag{6.40}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} v(t).dt = \frac{\Delta t}{2}.[v(t_2) + v(t_1)] \tag{6.41}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} i(t).dt = \frac{\Delta t}{2}.[i(t_2) + i(t_1)] \tag{6.42}$$

Substituindo nas equações diferenciais (6.37) e (6.38) os integrais dados pelas expressões (6.39), (6.40), (6.41) e (6.42) obtêm-se:

$$\begin{cases} \frac{\Delta t}{2}.\left[v(t_1)+v(t_o)\right] = R.\frac{\Delta t}{2}.\left[i(t_1)+i(t_o)\right] + L.\left[i(t_1)+i(t_o)\right] \\ \frac{\Delta t}{2}.\left[v(t_2)+v(t_1)\right] = R.\frac{\Delta t}{2}.\left[i(t_2)+i(t_1)\right] + L.\left[i(t_2)+i(t_1)\right] \end{cases} \tag{6.43}$$

A equação (6.43) poderá ser reescrita, em termos matriciais, para as amostras k, $k+1$ e $k+2$:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2}.(i_{k+1}+i_k) & (i_{k+1}-i_k) \\ \frac{\Delta t}{2}.(i_{k+2}+i_{k+1}) & (i_{k+2}+i_{k+1}) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2}.(v_{k+1}+v_k) \\ \frac{\Delta t}{2}.(v_{k+2}+v_{k+1}) \end{bmatrix} \tag{6.44}$$

Com as três amostras de tensão e intensidade de corrente (k, $k+1$ e $k+2$) é possível estimar os valores de R e L:

$$\begin{cases} R = \dfrac{(v_{k+1}+v_k).(i_{k+2}-i_{k+1})-(v_{k+2}+v_{k+1}).(i_{k+1}-i_k)}{(i_{k+1}+i_k).(i_{k+2}-i_{k+1})-(i_{k+2}+i_{k+1}).(i_{k+1}-i_k)} \\ L = \dfrac{(i_{k+1}+i_k).(v_{k+2}+v_{k+1})-(i_{k+2}-i_{k+1}).(v_{k+1}+v_k)}{(i_{k+1}+i_k).(i_{k+2}-i_{k+1})-(i_{k+2}+i_{k+1}).(i_{k+1}-i_k)} \end{cases} \tag{6.45}$$

As equações (6.45) permitem calcular R e L bastando, para isso, que haja conhecimento de seis amostras, três tensões e três intensidades de corrente, e implicando a realização de seis multiplicações e duas divisões. Perante o número e tipo de operações a implementar, é de esperar uma boa performance em termos de processamento do relé.

No modelo apresentado não são consideradas as capacidades distribuídas das linhas. Este modelo não se ajusta à realidade, sendo de esperar erros mais significativos para linhas mais longas.

É possível diminuir os erros com a utilização de janelas mais largas, correspondendo a intervalos de tempo Δt mais longos.

6.4.2 - Erros associados aos algoritmos utilizando equações diferenciais

As fontes de erros dos algoritmos utilizando equações diferenciais localizam-se na cadeia de tratamento do sinal até sofrer tratamento numérico. Transformadores de medida, transductores, filtros e outros aparelhos, alteram o sinal real, causando erros na estimativa dos valores. A componente DC, ao contrário das situações anteriores, não altera a estimativa, não sendo por isso necessário proceder à remoção.

Os valores medidos $i_m(t)$ e $v_m(t)$ podem-se definir como sendo:

$$i_m(t) = i(t) + \varepsilon_i(t) \tag{6.46}$$

$$v_m(t) = v(t) + \varepsilon_v(t) \tag{6.47}$$

As funções $v(t)$ e $i(t)$ satisfazem as equações diferenciais. Substituindo na equação (6.36) as expressões (6.46) e (6.47) obtêm-se:

$$Ri_m(t) + L.\frac{di_m(t)}{dt} = v_m(t) + R.\varepsilon_i(t) + L\frac{d\varepsilon_i(t)}{dt} - \varepsilon_v(t) \tag{6.48}$$

Os valores de tensão e intensidade de corrente medidos satisfazem uma equação diferencial que possui três parcelas associadas a erros. Se os sinais de erro verificarem a equação diferencial, os mesmos, não vão contribuir para o erro final das estimativas de R e L.

O denominador das expressões (6.45) é uma função do tempo e dependente das três amostras utilizadas para o calculo de R e L. Simplificando o denominador obtém-se:

$$(i_{k+1} + i_k).(i_{k+2} - i_{k+1}) - (i_{k+2} + i_{k+1}).(i_{k+1} - i_k) = -2.(i^2{}_{k+1} - i_k.i_{k+2}) \tag{6.49}$$

Analisando-se a equação (6.49) conclui-se que os erros são amplificados quando o denominador é pequeno. Quando mais se aproximar de zero o denominador, maior é a sensibilidade do algoritmo mesmo a pequenos erros. Este problema é ultrapassado considerando que uma estimativa de valores R-L não é suficiente para provocar a actuação do relé. Na verdade, o algoritmo pode ser modificado por forma a exigir-se que esteja disponível uma sequência de estimativas antes de se dar ordem de actuação ao disjuntor. Se a estimativa se localizar dentro de um plano R-L, que é definido como zona de actuação do relé, é valida, incrementando um

contador de uma unidade, caso contrário este é decremento. O sinal para actuação do disjuntor é emitido se o contador tiver um valor igual ou superior a um número especificado pelo utilizador.

6.4.3 - Um modelo mais realista para utilização dos algoritmos utilizando equações diferenciais

Na figura 6.4 apresenta-se um modelo mais realista das linhas de transmissão de energia. Neste modelo foi incluída uma capacidade.

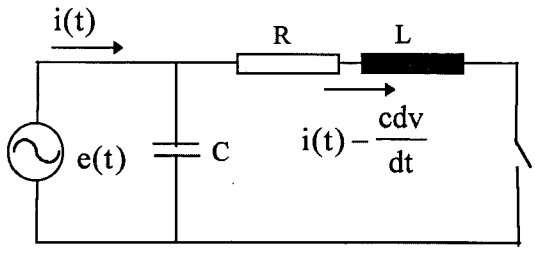


Figura 6.4 - Modelo mais realista da linha com defeito

Neste caso, a equação que relaciona a tensão e a intensidade de corrente vistos pelo relé será:

$$v(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} - R.C\frac{dv(t)}{dt} - L.C\frac{d^2v(t)}{dt^2} \qquad (6.50)$$

Utilizando quatro amostras consecutivas e igualmente espaçadas de Δt obtém-se a matriz:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2}.(i_{k+1}+i_k) & (i_{k+1}-i_k) & -(v_{k+1}-v_k) & \frac{-1}{\Delta t}(v_{k+1}-2v_k+v_{k-1}) \\ \frac{\Delta t}{2}.(i_{k+2}+i_{k+1}) & (i_{k+2}+i_{k+1}) & -(v_{k+2}-v_{k+1}) & \frac{-1}{\Delta t}(v_{k+2}-2v_{k+1}+v_k) \\ \frac{\Delta t}{2}.(i_{k+3}+i_{k+2}) & (i_{k+3}+i_{k+2}) & -(v_{k+3}-v_{k+2}) & \frac{-1}{\Delta t}(v_{k+3}-2v_{k+2}+v_{k+1}) \\ \frac{\Delta t}{2}.(i_{k+4}+i_{k+3}) & (i_{k+4}+i_{k+3}) & -(v_{k+4}-v_{k+3}) & \frac{-1}{\Delta t}(v_{k+4}-2v_{k+3}+v_{k+2}) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} R \\ L \\ RC \\ LC \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} \cdot (v_{k+1} + v_k) \\ \frac{\Delta t}{2} \cdot (v_{k+2} + v_{k+1}) \\ \frac{\Delta t}{2} \cdot (v_{k+3} + v_{k+2}) \\ \frac{\Delta t}{2} \cdot (v_{k+4} + v_{k+3}) \end{bmatrix} \qquad (6.51)$$

Na matriz presente em (6.51) considerou-se:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta t} \qquad (6.52)$$

Este modelo exige a realização de um número muito mais elevado de cálculos quando comparado com o modelo anterior pelo que os tempos de processamento serão mais elevados. Por outro lado, verifica-se que os termos RC e LC são pequenos para defeitos próximos do relé ou linhas de níveis de tensão baixos. Nestas situações, as vantagens inerentes a este modelo não compensam o aumento do tempo de cálculo.

Capítulo 7

Estudo de uma rede de distribuição de energia - exemplo 5

7 - ESTUDO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA - EXEMPLO 5

7.1 - Dados da simulação

O exemplo 5, simula um curto-circuito trifásico simétrico na rede de distribuição de energia apresentada na figura 7.1.

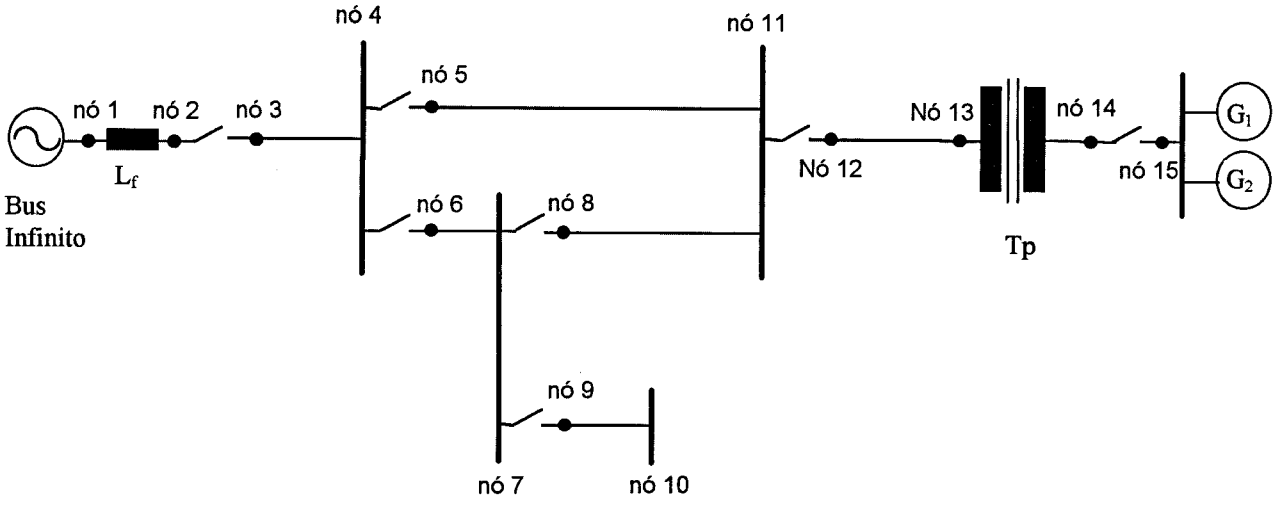


Figura 7.1 - Esquema da rede de distribuição de energia do exemplo 5 onde se vai simular um curto circuito trifásico simétrico

Os dados do exemplo5 são:

- Todos os dados vão ser convertidos para p.u. e a potência de base será a potência de 100 MVA. A impedância de base dos 60 kV será:

$$Z_{base(60kV)} = \frac{60^2}{100} = 36\Omega$$

- A impedância da fonte L_f (nó1-nó2), é calculada a partir da potência de curto-circuito no ponto de ligação da linha ao barramento infinito (20 GVA). A reactância equivalente da rede será:

$$X_f = \frac{1}{314} \cdot \frac{60^2}{20000} x314x36 = 0{,}1799\Omega$$

- As linhas são representadas pelo esquema equivalente em Π considerando:

. R_{3-4} = 2,999/36 = 0,0833 p.u.;

. L_{3-4} = 8,401/36 = 0,2334 p.u.;

. R_{6-7} = 0,846/36 = 0,0235 p.u.;

. L_{6-7} = 2,370/36 = 0,0658 p.u.;

. R_{9-10} = 0,074/36 = 0.,0021 p.u.;

. L_{9-10} = 0,074/36 = 0,0021 p.u.;

. R_{8-11} = 0,725/36 = 0,0201 p.u.;

. L_{8-11} = 2,031/36 = 0,0564 p.u.;

. R_{5-11} = 1,571/36 = 0,0437 p.u.;

. L_{5-11} = 4,401/36 = 0,1222 p.u.;

. R_{12-13} = 1,612/36 = 0,0448 p.u.;

. L_{12-13} = 4,515/36 = 0,1254 p.u.;

As características do transformador, barramento infinito e geradores são iguais às do exemplo4.

O ficheiro com os dados de entrada do exemplo5 é apresentado na listagem 7.1.

7.2 - Resultados da simulação

Na listagem 7.2 (anexo E), encontram-se os resultados da simulação de um curto circuito curto-circuito trifásico simétrico no nó 10.

A figura 7.2, mostra a evolução temporal das tensões nos nós 10A, 10B e 10C, nós onde é simulado o curto circuito trifásico simétrico. As ondas antes do defeito são sinusóides perfeitas e o defeito introduzido no instante t = 40 ms provoca a anulação das três tensões. Na figura 7.3 apresenta-se o andamento das ondas de intensidade de corrente nos ramos 7A-9A, 7B-9B, 7C-

9C, 10A-terra, 10B-terra e 10C-terra, podendo-se identificar um primeiro período antes do defeito, em que as intensidades de corrente são nulas dado que se encontra em vazio.

```
Ln                                                    PROGRAMA
 1 BEGIN NEW DATA CASE
 2 C Ficheiro - EXEMPLO5.DAT
 3 C
 4 POWER FREQUENCY, 50
 5 C
 6 C Definição de dados gerais reais
 7 C
 8 C DELTAT     TMAX     XOPT     COPT   EPSILN   TOLMAT   TSTART
 9 0.000278    0.100     50.0     50.0
10 C
11 C Definição de dados gerais inteiros
12 C
13 C    IOUT    IPLOT   IDOUBL   KSSOUT   MAXOUT     IPUN   MEMSAV     ICAT   NENERG   IPRSUP
14         1        1                                  0
15 C
16 C Definição de dados dos ramos
17 C
18 C Impedancia da fonte
19 C
20 C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R      L      C
21   NO1A   NO2A                      0.1799
22   NO1B   NO2B                      0.1799
23   NO1C   NO2C                      0.1799
24 C
25 C Linha em equivalente PI (sem acoplamentos)
26 C
27 C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R      L      C      R      L      C      R      L      C
28   USE RL
29  1NO3A   NO4A                0.08330.2334    0
30  2NO3B   NO4B                                  0.08330.2334      0
31  3NO3C   NO4C                                                      0.08330.2334      0
32 C
33  1NO6A   NO7A                0.02350.0658      0
34  2NO6B   NO7B                                  0.02350.0658      0
35  3NO6C   NO7C                                                      0.02350.0658      0
36 C
37  1NO9A   NO10A               0.00210.0021      0
38  2NO9B   NO10B                                 0.00210.0021      0
39  3NO9C   NO10C                                                     0.00210.0021      0
40 C
41  1NO8A   NO11A               0.02010.0564      0
42  2NO8B   NO11B                                 0.02010.0564      0
43  3NO8C   NO11C                                                     0.02010.0564      0
44 C
45  1NO5A   NO11A               0.04360.1222      0
46  2NO5B   NO11B                                 0.04360.1222      0
47  3NO5C   NO11C                                                     0.04360.1222      0
48 C
49  1NO12A   NO13A              0.04480.1254      0
50  2NO12B   NO13B                                0.04480.1254      0
51  3NO12C   NO13C                                                    0.04480.1254      0
52 C
53 C Transformador
54 C
55   TRANSFORMER                          TRAN A
```

Listagem 7.1 - Ficheiro (exemplo5.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito trifásico simétrico na rede de distribuição de energia da fig. 7.1

```
9999
 1NO13A                                  4.320   34.68
 2NO14A NO14C                            0.076   13.80
  TRANSFORMER TRAN A                            TRAN B
 1NO13B
 2NO14B NO14A
  TRANSFORMER TRAN A                            TRAN C
 1NO13C
 2NO13C NO14B
C ----- Connectivity capacitors
  NO15A                                          1.0
  NO15B                                          1.0
  NO15C                                          1.0
BLANK CARD ENDING BRANCH DATA.
C Definição dos dados dos interruptores
C
C Interruptor principal
C
C BUS1   BUS2        TCLOSE      TOPEN         IE
  NO2A   NO3A          -1.0        1.1        0.0                    0
  NO2B   NO3B          -1.0        1.1        0.0                    0
  NO2C   NO3C          -1.0        1.1        0.0                    0
C
  NO4A   NO5A          -1.0        1.1        0.0                    0
  NO4B   NO5B          -1.0        1.1        0.0                    0
  NO4C   NO5C          -1.0        1.1        0.0                    0
C
  NO4A   NO6A          -1.0        1.1        0.0                    0
  NO4B   NO6B          -1.0        1.1        0.0                    0
  NO4C   NO6C          -1.0        1.1        0.0                    0
C
  NO7A   NO8A          -1.0        1.1        0.0                    0
  NO7B   NO8B          -1.0        1.1        0.0                    0
  NO7C   NO8C          -1.0        1.1        0.0                    0
C
  NO7A   NO9A          -1.0        1.1        0.0                    1
  NO7B   NO9B          -1.0        1.1        0.0                    1
  NO7C   NO9C          -1.0        1.1        0.0                    1
C
  NO11A  NO12A         -1.0        1.1        0.0                    0
  NO11B  NO12B         -1.0        1.1        0.0                    0
  NO11C  NO12C         -1.0        1.1        0.0                    0
C
  NO14A  NO15A         -1.0        1.1        0.0                    0
  NO14B  NO15B         -1.0        1.1        0.0                    0
  NO14C  NO15C         -1.0        1.1        0.0                    0
C
C Interruptor que cria o curto-circuito
C
C BUS1   BUS2        TCLOSE      TOPEN         IE
  NO10A              40.E-3        1.0        0.0                    1
  NO10B              40.E-3        1.0        0.0                    1
  NO10C              40.E-3        1.0        0.0                    1
BLANK CARD ENDING SWITCH DATA.
C
```

Listagem 7.1 - Ficheiro (exemplo5.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito trifásico simétrico na rede de distribuição de energia da fig. 7.1 (continuação)

```
C ----- Infinite bus voltages
C
14NO1A        48990     50.0        0.0                                  -1.0
14NO1B        48990     50.0     -120.0                                  -1.0
14NO1C        48990     50.0      120.0                                  -1.0
C
C ----- Synchronous machine specifications
C
59NO15A    11718.36     50.0       34.0
  NO15B
  NO15C
C ----- First generator
PARAMETER FITTING        2.0
C --- Machine ratings
 1 1      8       0.55       0.55      90.0       13.8      280.0
BLANK CARD - NO SATURATION MODELING
C --- Machine parameters - manufacturer's data
 0.038      0.220      1.200      0.700      0.350      0.700      0.250      0.230
 6.240                 0.032      0.060      0.150
C --- Mechanical system data
 1          1.0        3.116092
BLANK CARD ENDING MASS CARDS
C --- Output data request
BLANK CARD ENDING OUTPUT REQUEST
  FINISH PART
C ----- Second generator
PARAMETER FITTING        2.0
C --- Machine ratings
 1 1      8       0.45       0.45      76.0       13.8      250.0
BLANK CARD - NO SATURATION MODELING
C --- Machine parameters - manufacturer's data
 0.004      0.175      1.150      0.685      0.310      0.685      0.210      0.182
 5.850                 0.036      0.073      0.132
C --- Mechanical system data
 1          1.0        3.333065
BLANK CARD ENDING MASS CARDS
C --- Output data request
BLANK CARD ENDING OUTPUT REQUEST
  FINISH
BLANK CARD ENDING SOURCE DATA.
C ----- Node voltage output request
  NO10A NO10B NO10C
BLANK CARD ENDING SELECTIVE NODE VOLTAGE OUTPUT REQUEST.
  PRINTER PLOT
BLANK CARD ENDING PLOT REQUEST.
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

Listagem 7.1 - Ficheiro (exemplo5.dat) com os dados referentes à simulação de um curto circuito trifásico simétrico na rede de distribuição de energia da fig. 7.1 (continuação)

Pode notar-se, na mesma figura que as intensidades de corrente de defeito correspondem à sobreposição de um termo sinusoidal e de uma componente exponencial que se atenua rapidamente. Assim, após este período transitório, atinge-se um regime em que as intensidades de corrente são representadas por sinusoides perfeitas.

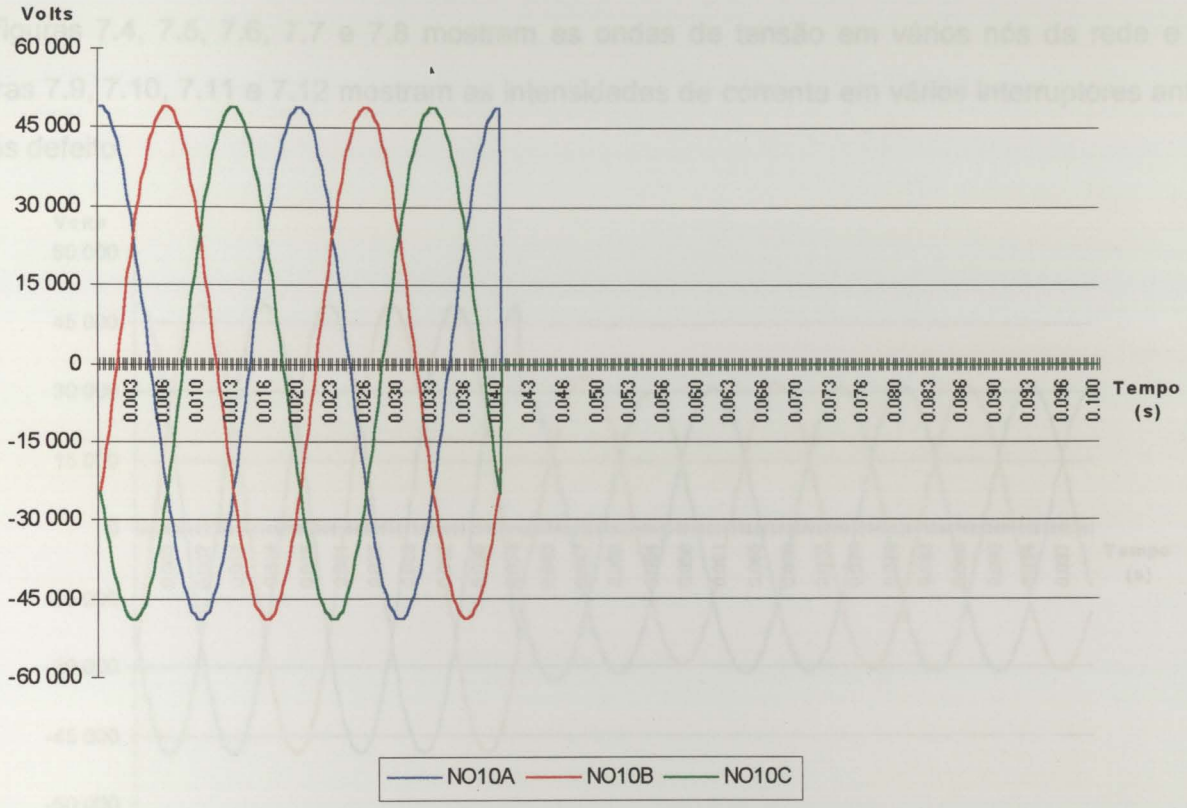


Figura 7.2 - Tensões nos nós 10A, 10B e 10C nó onde foi simulado um curto circuito trifásico simétrico

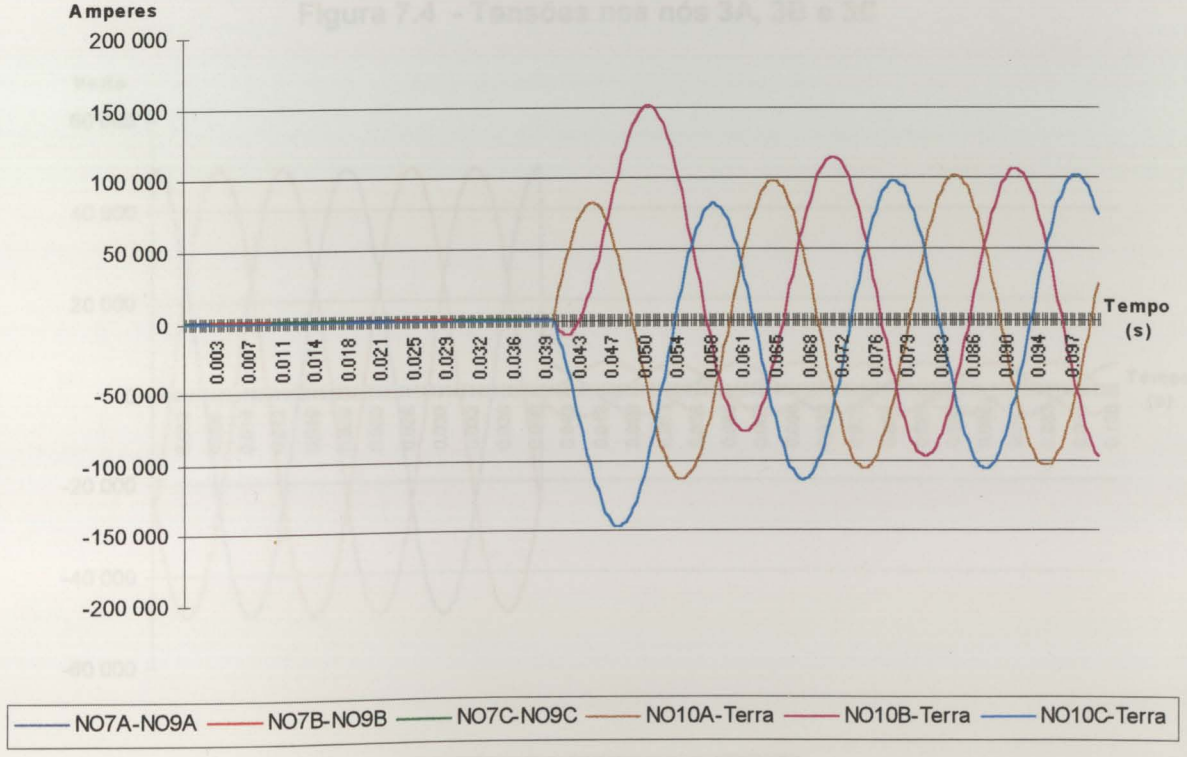


Figura 7.3 - Intensidades de corrente nos ramos 7A-9A, 7B-9B, 7C-9C, 10A-Terra, 10B-Terra e 10C-Terra

As figuras 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8 mostram as ondas de tensão em vários nós da rede e as figuras 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12 mostram as intensidades de corrente em vários interruptores antes e pós defeito.

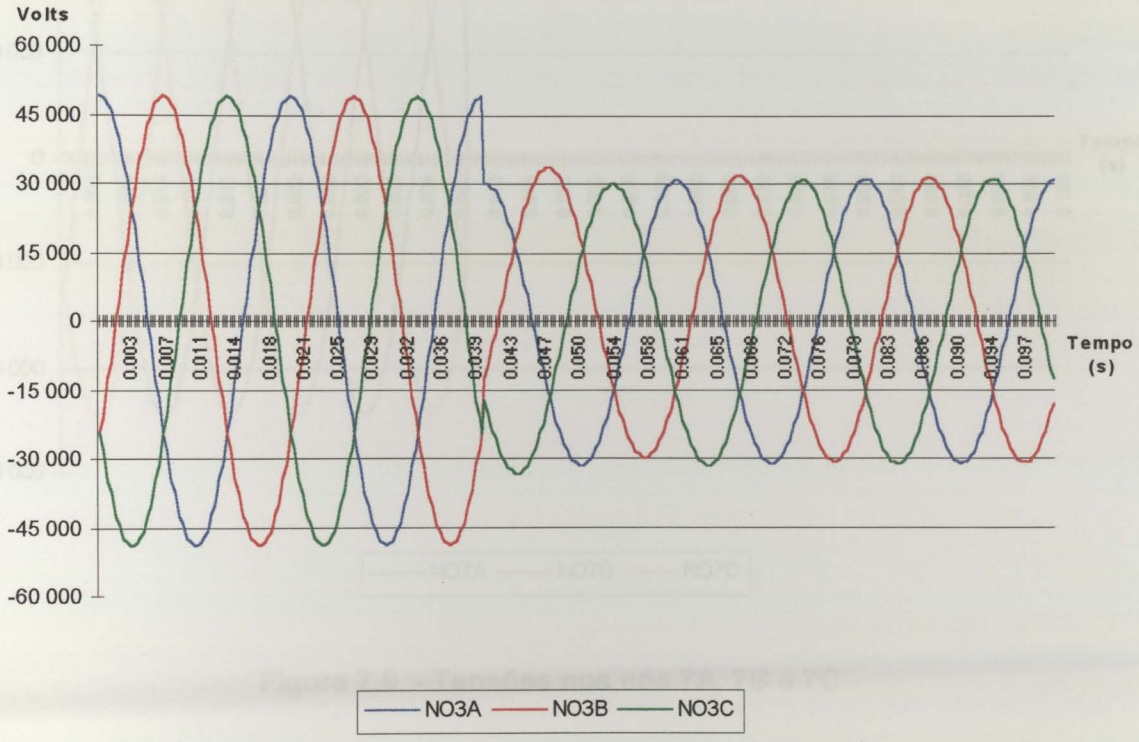


Figura 7.4 - Tensões nos nós 3A, 3B e 3C

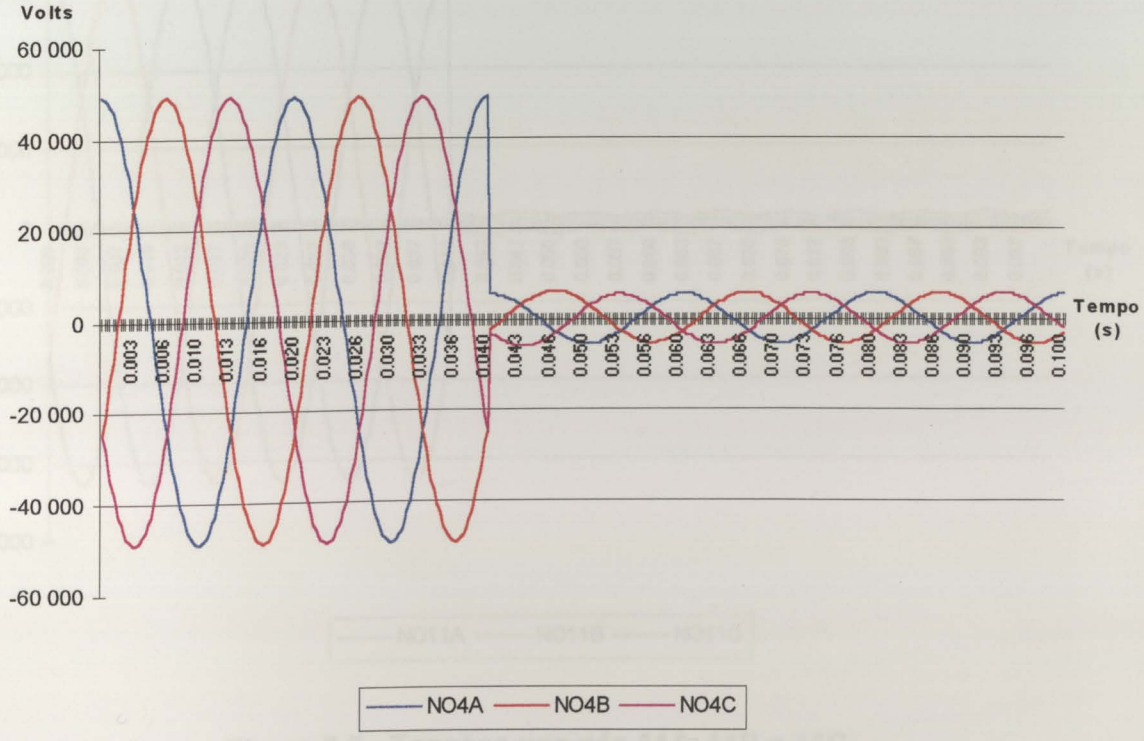


Figura 7.5 - Tensões nos nós 4A, 4B e 4C

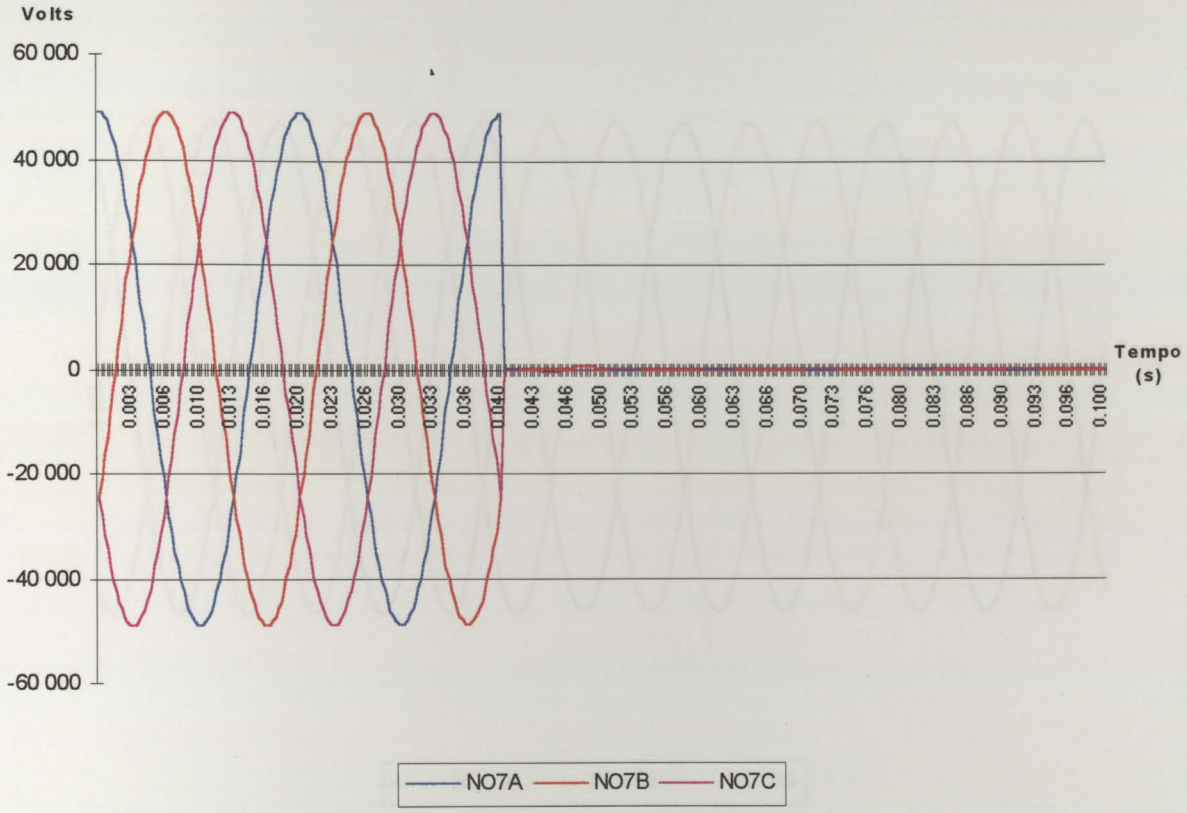


Figura 7.6 - Tensões nos nós 7A, 7B e 7C

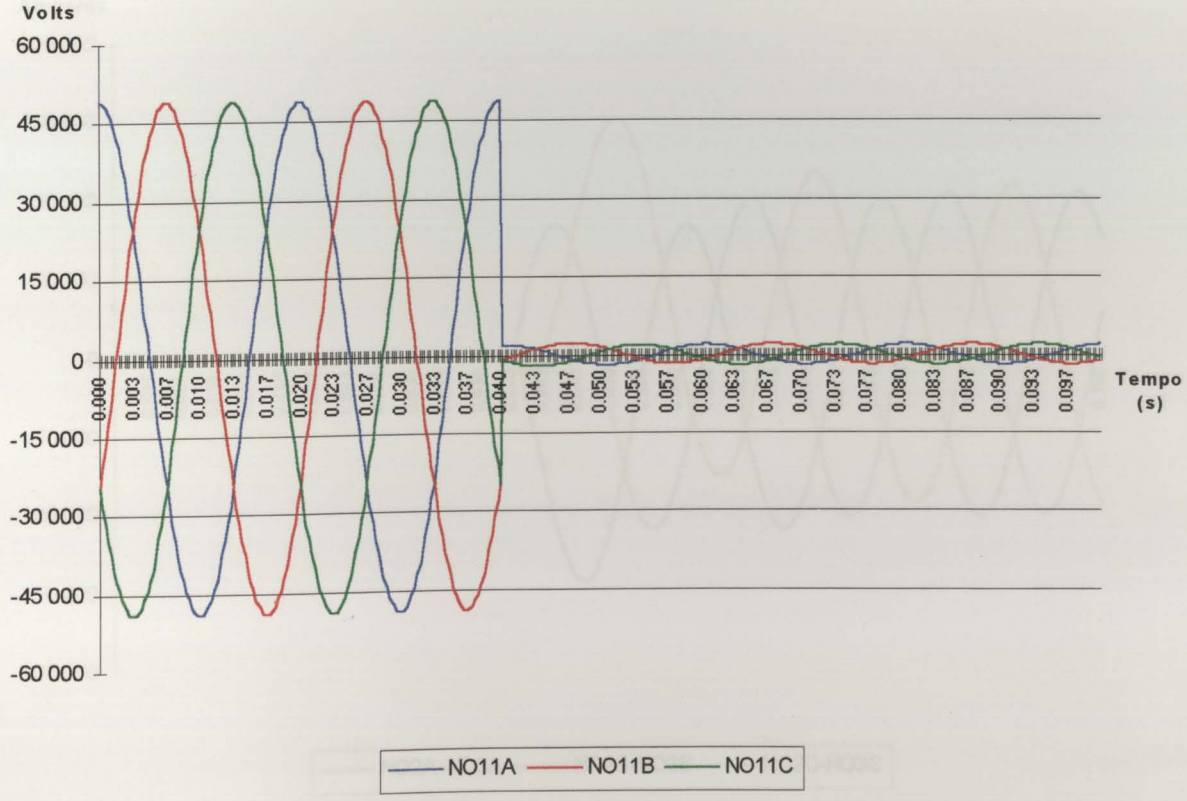


Figura 7.7 - Tensões nos nós 11A, 11B e 11C

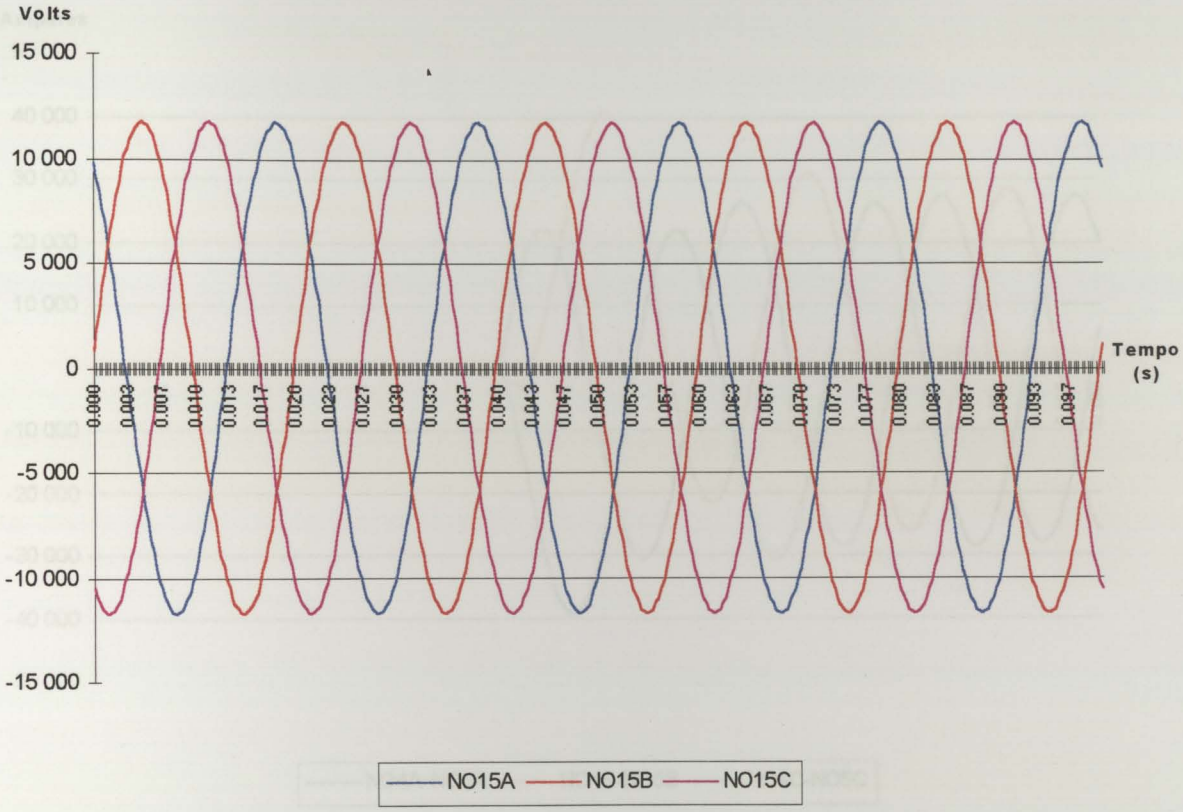


Figura 7.8 - Tensões nos nós 15A, 15B e 15C

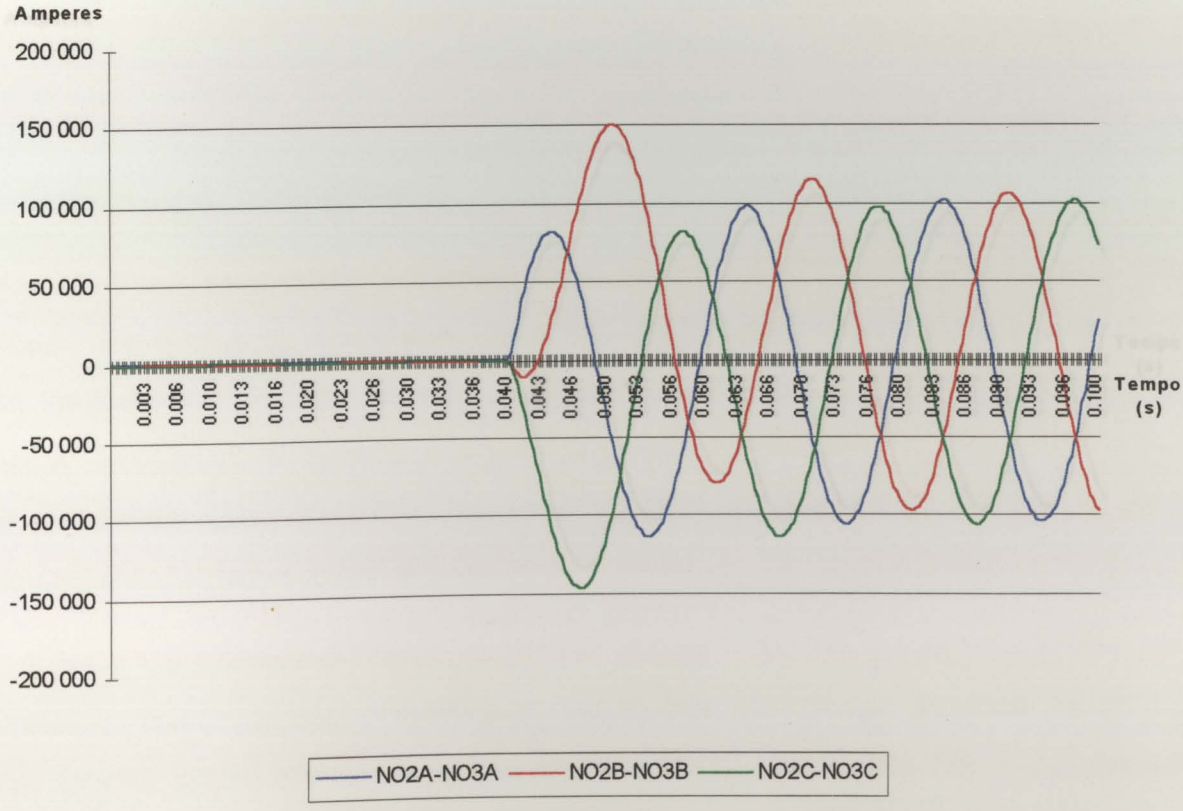


Figura 7.9 - Intensidades de corrente nos ramos 2A-3A, 2B-3B, 2C-3C

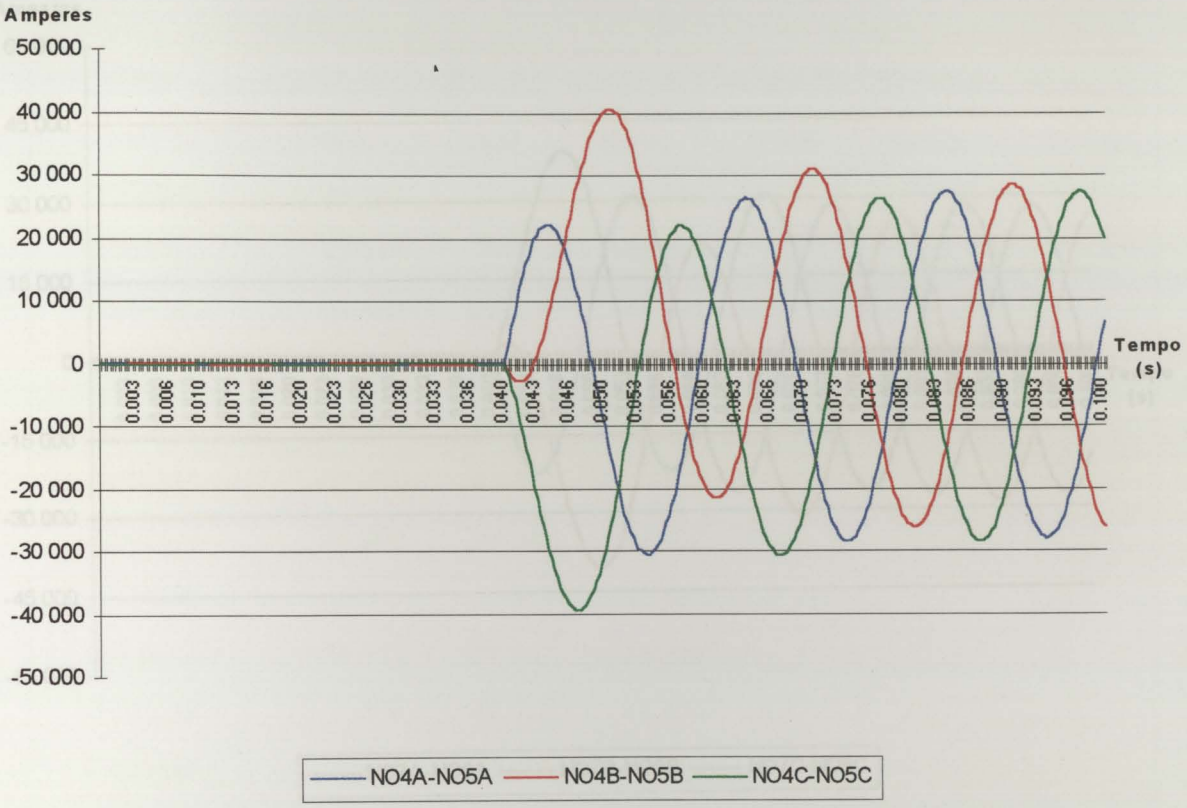


Figura 7.10 - Intensidades de corrente nos ramos 4A-5A, 4B-5B, 4C-5C

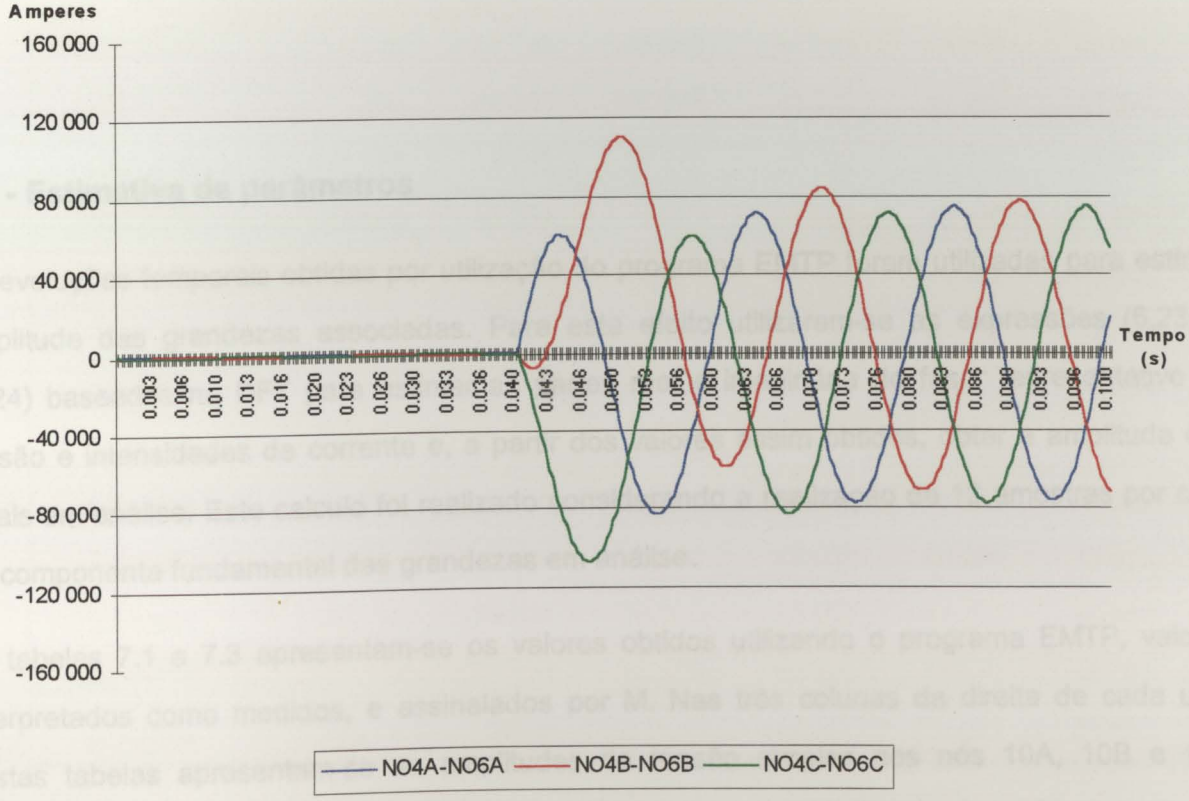


Figura 7.11 - Intensidades de corrente nos ramos 4A-6A, 4B-6B, 4C-6C

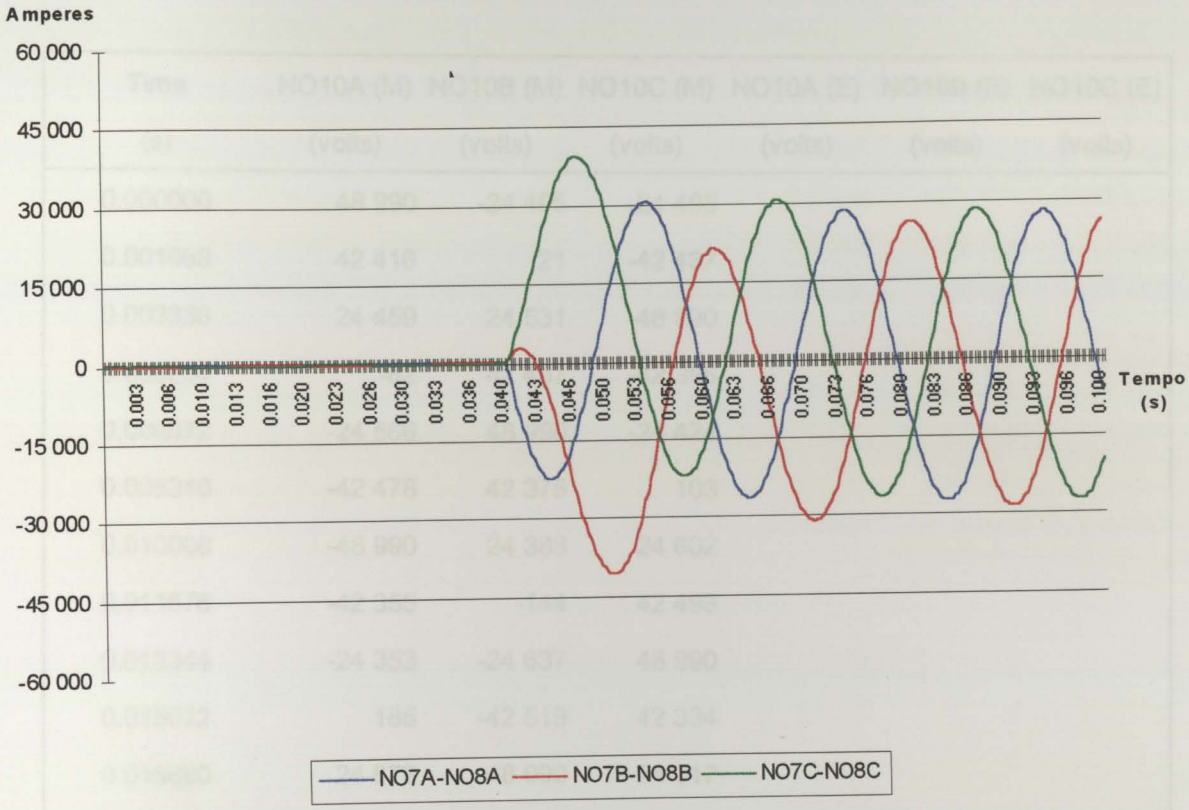


Figura 7.12 - Intensidades de corrente nos ramos 7A-8A, 7B-8B, 7C-8C

7.3 - Estimativa de parâmetros

As evoluções temporais obtidas por utilização do programa EMTP foram utilizadas para estimar amplitude das grandezas associadas. Para este efeito utilizaram-se as expressões (6.23) e (6.24) baseadas na DFT para estimar as partes real e imaginária do fasor representativo de tensão e intensidades de corrente e, a partir dos valores assim obtidos, obter a amplitude dos sinais em análise. Este calculo foi realizado considerando a realização de 12 amostras por ciclo da componente fundamental das grandezas em análise.

As tabelas 7.1 a 7.3 apresentam-se os valores obtidos utilizando o programa EMTP, valores interpretados como medidos, e assinalados por M. Nas três colunas da direita de cada uma destas tabelas apresentam-se as amplitudes da tensão simples nos nós 10A, 10B e 10C (tabela7.1) e 3A, 3B e 3C (tabela 7.3) e a amplitude das intensidades de corrente no ramo 7A-9A, 7B-9B e 7C-9C (tabela 7.2).

Time (s)	NO10A (M) (volts)	NO10B (M) (volts)	NO10C (M) (volts)	NO10A (E) (volts)	NO10B (E) (volts)	NO10C (E) (volts)
0.000000	48 990	-24 495	-24 495			
0.001668	42 416	21	-42 437			
0.003336	24 459	24 531	-48 990			
0.005004	-62	42 457	-42 396			
0.006672	-24 566	48 990	-24 424			
0.008340	-42 478	42 375	103			
0.010008	-48 990	24 388	24 602			
0.011676	-42 355	-144	42 498			
0.013344	-24 353	-24 637	48 990			
0.015012	185	-42 519	42 334			
0.016680	24 673	-48 990	24 317			
0.018348	42 539	-42 313	-226			
0.020016	48 989	-24 281	-24 708	49 008	48 972	48 990
0.021684	42 293	267	-42 559	48 990	48 972	49 008
0.023352	24 246	24 743	-48 989	48 972	48 990	49 008
0.025020	-308	42 580	-42 272	48 972	49 008	48 990
0.026688	-24 779	48 989	-24 210	48 990	49 008	48 972
0.028356	-42 600	42 251	349	49 008	48 990	48 972
0.030024	-48 989	24 174	24 814	49 008	48 972	48 990
0.031692	-42 230	-390	42 620	48 990	48 972	49 008
0.033360	-24 139	-24 850	48 988	48 972	48 990	49 008
0.035028	431	-42 640	42 209	48 972	49 008	48 990
0.036696	24 885	-48 988	24 103	48 990	49 008	48 972
0.038364	42 661	-42 189	-472	49 008	48 990	48 972
0.040032	48 988	-24 067	-24 920	49 008	48 972	48 990
0.041700	0	0	0	43 078	48 972	42 961
0.043368	0	0	0	41 544	47 021	34 823

Tabela 7.1 - Tensões nos nós 10A, 10B e 10C medidas (M) e parâmetros estimados (E)

Time (s)	NO10A (M) (volts)	NO10B (M) (volts)	NO10C (M) (volts)	NO10A (E) (volts)	NO10B (E) (volts)	NO10C (E) (volts)
0.045036	0	0	0	41 535	41 325	28 582
0.046704	0	0	0	38 999	33 299	26 842
0.048372	0	0	0	32 668	26 701	26 834
0.050040	0	0	0	24 504	24 486	24 495
0.051708	0	0	0	18 782	24 486	18 641
0.053376	0	0	0	17 915	22 676	10 706
0.055044	0	0	0	17 886	17 698	4 090
0.056712	0	0	0	14 757	10 695	4 222
0.058380	0	0	0	8 165	4 011	4 153
0.060048	0	0	0	0	0	0
0.061716	0	0	0	0	0	0
0.063384	0	0	0	0	0	0
0.065052	0	0	0	0	0	0
0.066720	0	0	0	0	0	0
0.068388	0	0	0	0	0	0
0.070056	0	0	0	0	0	0
0.071724	0	0	0	0	0	0
0.073392	0	0	0	0	0	0
0.075060	0	0	0	0	0	0
0.076728	0	0	0	0	0	0
0.078396	0	0	0	0	0	0
0.080064	0	0	0	0	0	0
0.081732	0	0	0	0	0	0
0.083400	0	0	0	0	0	0
0.085068	0	0	0	0	0	0
0.086736	0	0	0	0	0	0
0.088404	0	0	0	0	0	0
0.090072	0	0	0	0	0	0
0.091740	0	0	0	0	0	0
0.093408	0	0	0	0	0	0
0.095076	0	0	0	0	0	0
0.096744	0	0	0	0	0	0
0.098412	0	0	0	0	0	0
0.100080	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.1 - Tensões nos nós 10A, 10B e 10C medidas (M) e parâmetros estimados (E) (continuação)

Time (s)	NO7A-9A (M) (Amperes)	NO7B-9B (M) (Amperes)	NO7C-9C (M) (Amperes)	NO7A-9A (E) (Amperes)	NO7B-9B (E) (Amperes)	NO7C-9C (E) (Amperes)
0.000000	0	0	0	0	0	0
0.001668	0	0	0	0	0	0
0.003336	0	0	0	0	0	0
0.005004	0	0	0	0	0	0
0.006672	0	0	0	0	0	0
0.008340	0	0	0	0	0	0
0.010008	0	0	0	0	0	0
0.011676	0	0	0	0	0	0
0.013344	0	0	0	0	0	0
0.015012	0	0	0	0	0	0
0.016680	0	0	0	0	0	0
0.018348	0	0	0	0	0	0
0.020016	0	0	0	0	0	0
0.021684	0	0	0	0	0	0
0.023352	0	0	0	0	0	0
0.025020	0	0	0	0	0	0
0.026688	0	0	0	0	0	0
0.028356	0	0	0	0	0	0
0.030024	0	0	0	0	0	0
0.031692	0	0	0	0	0	0
0.033360	0	0	0	0	0	0
0.035028	0	0	0	0	0	0
0.036696	0	0	0	0	0	0
0.038364	0	0	0	0	0	0
0.040032	0	0	0	0	0	0
0.041700	45 550	-10 574	-34 977	7 592	1 762	5 829
0.043368	76 524	4 736	-81 259	19 698	1 149	18 819

Tabela 7.2 - Intensidades de corrente nos ramos 7A-9A, 7B-9B e 7C-9C medidas (M) e parâmetros estimados (E)

Time (s)	NO7A-9A (M) (Amperes)	NO7B-9B (M) (Amperes)	NO7C-9C (M) (Amperes)	NO7A-9A (E) (Amperes)	NO7B-9B (E) (Amperes)	NO7C-9C (E) (Amperes)
0.045036	80 715	41 335	-122 050	31 117	6 787	36 928
0.046704	57 684	86 932	-144 616	37 514	20 983	55 859
0.048372	14 220	127 090	-141 310	38 292	40 047	70 710
0.050040	-37 470	149 073	-111 603	39 767	59 572	78 188
0.051708	-83 032	145 237	-62 205	50 910	74 663	78 892
0.053376	-109 808	115 058	-5 250	69 207	82 124	78 564
0.055044	-110 229	65 252	44 978	85 748	82 694	84 578
0.056712	-83 842	7 953	75 889	94 821	82 180	97 182
0.058380	-37 424	-42 559	79 983	96 497	87 905	109 360
0.060048	16 839	-73 704	56 865	97 149	100 151	115 370
0.061716	64 624	-77 995	13 371	99 392	110 377	117 202
0.063384	93 322	-55 054	-38 268	102 106	116 613	115 563
0.065052	95 422	-11 727	-83 695	104 465	118 571	111 430
0.066720	70 531	39 742	-110 273	105 975	116 766	106 104
0.068388	25 481	84 995	-110 476	106 484	112 251	101 017
0.070056	-27 505	111 400	-83 895	106 101	106 425	97 437
0.071724	-74 086	111 437	-37 351	105 092	100 843	96 100
0.073392	-101 654	84 709	16 945	103 798	96 901	96 958
0.075060	-102 716	38 046	64 670	102 574	95 425	99 285
0.076728	-76 902	-16 336	93 238	101 720	96 367	102 091
0.078396	-31 064	-64 115	95 179	101409	98925	104525
0.080064	22 564	-92 712	70 148	101 632	102 003	106 079
0.081732	69 649	-94 669	25 020	102 213	104 670	106 599
0.083400	97 609	-69 653	-27 956	102 900	106 371	106 197
0.085068	98 988	-24 549	-74 439	103 476	106 938	105 150
0.086736	73 457	28 386	-101 843	103 827	106 494	103 811
0.088404	27 907	74 809	-102 716	103 939	105 342	102 547
0.090072	-25 405	102 141	-76 735	103 857	103 872	101 669
0.091740	-72 143	102 939	-30 796	103 634	102 488	101 352
0.093408	-99 735	76 893	22 842	103 328	101 528	101 584
0.095076	-100 755	30 907	69 848	103 010	101 183	102 185
0.096744	-74 906	-22 754	97 660	102 768	101 437	102 895
0.098412	-29 108	-69 757	98 865	102 676	102 093	103 490
0.100080	24 366	-97 548	73 182	102 748	102 869	103 852

Tabela 7.2 - Intensidades de corrente nos ramos 7A-9A, 7B-9B e 7C-9C medidas (M) e parâmetros estimados (E) (continuação)

A análise das amplitudes obtidas permite verificar que o algoritmo utilizado exige o conhecimento de 12 amostras para cada grandeza por forma a disponibilizar a primeira estimativa (ver tabelas 7.1 e 7.3).

Na tabela 7.3 apresentam-se as amplitudes das tensões nas fases do nó 3 correspondentes à figura 7.4. Como se pode verificar, os valores estimados decrescem após a ocorrência do defeito, estabilizando num valor próximo de 31 kV. Como se pode verificar, a estabilização é atingida após 12 amostragens depois de se ter iniciado a diminuição do valor da amplitude das tensões. Este facto revela, novamente, que durante um ciclo (correspondente a 12 amostragens) a janela em análise continha, em simultâneo, valores de tensão pré e pós defeito.

Por outro lado, verifica-se que, após um período inicial da ocorrência do defeito em que ainda não se dispõe de 12 amostras, os valores de pico da intensidade de corrente apresentados na tabela 7.2 aproximam-se, nas três fases, de 103 kA. Nota-se alguma oscilação associada ao instante em que ocorre o defeito, à variação da reactância do alternador após o defeito e à presença de uma componente exponencial. A análise das formas de onda apresentadas nas figuras 7.3, 7.9, 7.10 e 7.11 permite comprovar que após o período transitório referido se atinge, ao fim de cerca de 3 ciclos, o regime permanente.

Simulações de defeitos noutras linhas da rede e simulação de outros tipos de defeitos poderão dar indicações úteis quer para avaliar se as regulações de diversos tipos de relés já existentes são ou não adequadas quer para regular relés a instalar de novo no sistema.

O EMTP poderá assim revelar-se um auxiliar precioso do Engenheiro nesta área.

Time (s)	NO3A (M) (Volts)	NO3B (M) (Volts)	NO3C (M) (Volts)	NO3A (E) (Volts)	NO3B (E) (Volts)	NO3C (E) (Volts)
0.000000	48 990	-24 495	-24 495	0	0	0
0.001668	42 416	21	-42 437	0	0	0
0.003336	24 459	24 531	-48 990	0	0	0
0.005004	-62	42 457	-42 396	0	0	0
0.006672	-24 566	48 990	-24 424	0	0	0
0.008340	-42 478	42 375	103	0	0	0
0.010008	-48 990	24 388	24 602	0	0	0
0.011676	-42 355	-144	42 498	0	0	0
0.013344	-24 353	-24 637	48 990	0	0	0
0.015012	185	-42 519	42 334	0	0	0
0.016680	24 673	-48 990	24 317	0	0	0
0.018348	42 539	-42 313	-226	0	0	0
0.020016	48 989	-24 281	-24 708	49 008	48 972	48 990
0.021684	42 293	267	-42 559	48 990	48 972	49 008
0.023352	24 246	24 743	-48 989	48 972	48 990	49 008
0.025020	-308	42 580	-42 272	48 972	49 008	48 990
0.026688	-24 779	48 989	-24 210	48 990	49 008	48 972
0.028356	-42 600	42 251	349	49 008	48 990	48 972
0.030024	-48 989	24 174	24 814	49 008	48 972	48 990
0.031692	-42 230	-390	42 620	48 990	48 972	49 008
0.033360	-24 139	-24 850	48 988	48 972	48 990	49 008
0.035028	431	-42 640	42 209	48 972	49 008	48 990
0.036696	24 885	-48 988	24 103	48 990	49 008	48 972
0.038364	42 661	-42 189	-472	49 008	48 990	48 972
0.040032	48 988	-24 067	-24 920	49 008	48 972	48 990
0.041700	27 614	-107	-27 507	46 915	48 972	46 824
0.043368	17 750	15 458	-33 208	46 415	48 208	44 194

Tabela 7.3 - Tensões nos nós 3A, 3B e 3C medidas (M) e parâmetros estimados (E)

Time (s)	NO3A (M) (Volts)	NO3B (M) (Volts)	NO3C (M) (Volts)	NO3A (E) (Volts)	NO3B (E) (Volts)	NO3C (E) (Volts)
0.045036	2 874	27 772	-30 647	46 389	46 115	42 508
0.046704	-12 994	33 433	-20 439	45 365	43 526	42 199
0.048372	-25 573	30 834	-5 262	42 921	41 840	42 194
0.050040	-31 464	20 595	10 869	40 001	41 529	41 095
0.051708	-29 068	5 393	23 675	38 086	41 558	38 492
0.053376	-19 010	-10 753	29 763	37 665	40 524	35 305
0.055044	-3 974	-23 566	27 540	37 658	37 977	33 081
0.056712	12 018	-29 655	17 637	36 634	34 790	32 482
0.058380	24 686	-27 431	2 745	34 159	32 508	32 514
0.060048	30 642	-17 528	-13 113	31 117	31 858	31 700
0.061716	28 296	-2 640	-25 656	31 221	31 904	31 455
0.063384	18 288	13 207	-31 494	31 275	31 756	31 172
0.065052	3 309	25 733	-29 043	31 283	31 486	30 925
0.066720	-12 612	31 553	-18 940	31 258	31 175	30 774
0.068388	-25 198	29 081	-3 883	31 207	30 905	30 746
0.070056	-31 065	18 963	12 102	31 141	30 741	30 829
0.071724	-28 634	3 897	24 738	31 075	30 711	30 972
0.073392	-18 553	-12 091	30 644	31 030	30 801	31 118
0.075060	-3 524	-24 722	28 246	31 021	30 957	31 225
0.076728	12 423	-30 619	18 196	31 048	31 117	31 280
0.078396	25 012	-28 211	3 199	31 092	31 235	31 289
0.080064	30 867	-18 153	-12 714	31 129	31 297	31 262
0.081732	28 419	-3 154	-25 265	31 148	31 306	31 210
0.083400	18 326	12 755	-31 081	31 152	31 276	31 141
0.085068	3 300	25 296	-28 596	31 152	31 217	31 073
0.086736	-12 625	31 098	-18 473	31 152	31 142	31 027
0.088404	-25 174	28 598	-3 424	31 149	31 068	31 018
0.090072	-30 978	18 463	12 516	31 135	31 018	31 046
0.091740	-28 479	3 408	25 071	31 111	31 010	31 091
0.093408	-18 345	-12 531	30 876	31 091	31 039	31 129
0.095076	-3 296	-25 079	28 374	31 087	31 087	31 149
0.096744	12 631	-30 872	18 240	31 101	31 129	31 153
0.098412	25 162	-28 358	3 195	31 121	31 151	31 153
0.100080	30 935	-18 214	-12 722	31 132	31 157	31 154

Tabela 7.3 - Tensões nos nós 3A, 3B e 3C medidas (M) e parâmetros estimados (E) (continuação)

Capítulo 8

Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento

8 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

Ao finalizar este texto importa realizar um balanço do trabalho realizado evidenciando as principais conclusões obtidas e identificando possíveis áreas que podem ser alvo de desenvolvimentos no futuro.

O presente trabalho tinha como objectivo genérico o estudo do programa EMTP por forma a ser possível simular diversos tipos de defeitos que podem ocorrer em redes eléctricas obtendo evoluções temporais de grandezas eléctricas - tensões e intensidades de corrente. Os valores assim obtidos seriam utilizados para estimar parâmetros associados às formas de onda respectivas de modo a ser possível avaliar a correcção da regulação de relés que possam estar já instalados ou obter elementos que constituam um auxílio na regulação de relés a instalar.

Para além deste objectivo genérico, pretendeu-se também atingir objectivos de índole didáctica materializado na apresentação de diversos exemplos associados a pequenas redes que permitem evidenciar diversos aspectos relacionados com a utilização do programa.

O objectivo genérico referido envolveu o estudo de modelos presentes no programa EMTP e o estudo de algoritmos de funcionamento de relés digitais baseados na análise da forma de onda e utilizando modelos do sistema. Estes aspectos encontram-se detalhados nos capítulos 2 a 6. No capítulo 7 apresentam-se os resultados de uma simulação envolvendo um rede eléctrica baseada num sistema de distribuição português.

Após este estudo e tendo realizado um número de substancial de simulações ganhou-se experiência na utilização do programa EMTP que permitem apresentar algumas conclusões genéricas:

- Os modelos dos componentes de um SEE incorporados no programa EMTP são muito variados e a sua utilização é flexível permitindo a modelização de muitas situações em condições muito próximas da realidade;

- O programa EMTP revela-se uma ferramenta muito poderosa para simulação de fenómenos transitórios electromagnéticos em redes eléctricas de dimensão realista adequando-se, assim, ao objectivo genérico apresentado para este trabalho;

- O processo a utilizar para especificar os dados revela-se pouco amigável. Este facto está sem dúvida associado à necessidade de utilização de um ficheiro de texto em que os dados deverão ser incluídos em campos pré-definidos obrigando a uma atenção muito cuidada pelo utilizador. A

saída de resultados também não é a mais adequada. Com efeito, os resultados são debitados para um ficheiro de texto obrigando à proceder à sua formatação adequada de modo a que seja possível realizar o seu tratamento posterior.

Ao apresentar este texto tem-se consciência de que o estudo do programa EMTP não ficou esgotado no presente trabalho. O curto período em que este trabalho foi realizado não permitiram estudar os modelos utilizados pelo EMTP para representar diversos componentes dos SEE tais como máquinas assíncronas e sistemas de controlo.

O desenvolvimento deste trabalho, para além de dever permitir completar o estudo do programa EMTP já referido, poderá evoluir em duas grandes direcções. Por um lado, considera-se importante desenvolver uma interface que permita especificar os dados da simulação de uma forma mais amigável. Este interface poderia assumir a forma de um programa que gerasse um ficheiro de texto a ser lido pelo EMTP. O utilizador veria, assim, a sua tarefa facilitada sempre que pretendesse realizar simulações de fenómenos transitórios.

Uma outra direcção consiste na integração do EMTP numa aplicação mais vasta que constituísse um simulador de protecções digitais instalados ou a instalar em redes eléctricas. O EMTP constituiria, assim, um módulo desse simulador que integraria, também, módulos referentes à estimativa de amplitudes e fases de tensões ou intensidades de corrente - componente fundamentais e harmónicos - valores de impedância vistas de determinado ponto. Um simulador deste género constituiria um auxiliar importante do Engenheiro no desempenho de tarefas complexas e exigindo a realização de cálculos morosos.

Referências e Bibliografia

REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA

[1] - Arun G. Phadke e James S. Thorp, Computer Relaying for Power Systems, editora John Wiley & Sons New York, 1988.

[2] - Carlos Castro Carvalho, Transformadores, FEUP, 1983.

[3] - Guillaume Murere, Serge Lefebvre e Xuan Daí Do, A Generalized Harmonic Balance Method for EMTP Initialization, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Nº 3, July 1995.

[4] - João Paulo Saraiva, A. Machado e Moura, Teoria de Funcionamento de uma Linha em Regime Permanente, FEUP, Janeiro de 1987.

[5] - João Paulo Saraiva, Protecção de Sistemas de Energia, FEUP, 1988.

[6] - Juan A. Martinez, EMTP Simulation of a Digitally-Controlled Static Var System for Optimal Load Compensation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Nº 3, July 1995.

[7] - K. U. Leuven EMTP Center Kard, Alternative Transients Program - Rule Book, June 1992.

[8] - Luis Rouco, Curso sobre: "Simulación de Transitorios en Sistemas Eléctricos Mediante el Programa ATP", Instituto de Investigación Tecnológica (I.I.T.) Universidad Pontificia Comillas, Sevilla, Noviembre-Diciembre 1994.

[9] - Manuel Vaz Guedes, Mecânica do Sistema de Accionamento, FEUP, 1994.

[10] - Manuel Vaz Guedes, O Alternador Síncrono Trifásico, FEUP, 1996.

[11] - M. Kezunovic, Lj. Kezunovic , C. W. Fromen, D. R. Sevcik e F. Philips, Experimental Evalution of EMTP-Based Current Tranformer Models for Protective Transient Study, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, Nº 1, January 1994.

[12] - S.F.Mauser e T.E. McDermott (principais investigadores), Westinghouse Electric Corporation, Electromagnetic Transients Program (EMTP) Primer, Final Report, September 1985.

[13] - S. Horowitz, Arun G. Phadke, Power System Relaying, John Wiley & Sons, New York, 1992.

[14] - Srinivas Varadan, Elham B. Makram e Adly A. Girgis, A New Time Domain Voltage Source Model for na Arc Furnace Using EMTP, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, Nº 3, July 1996.

[15] - W. Zhu, R. Spee, R.R. Mohler, G.C. Alexander, W.A. Mittelstadt e D. Maratukulam, An EMTP Study of SSR Mitigation Using the Thyristor Controlled Series Capacitor, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Nº 3, July 1995.

[16] - X. Lombard, J. Mahseredjian, S. Lefebvre e C. Kieny, Implementation of a New Harmonic Initialization Method in the EMTP, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Nº 3, July 1995.

[17] - Xusheng Chen, A Three-Phase Multi-Legged Transformer Model in ATP Using the Directly-Formed Inverse Inductance Matrix, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, Nº 3, July 1996.

Anexo A

Listagem 3.2

```
   ---    69    cards of disk file read into card cache cells  1    onward.
Alternative Transients Program (ATP), Salford 80386 translation.  All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA.
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 28-Sep-96  11.31.15     Name of disk plot file, if any, is  C:EXEMPLO1.pl4
Consult the 800-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTP User Group in Portland,  Oregon, USA.   Program is no older than July, 1993.
Total size of LABCOM tables =  2003949   INTEGER words.   VARDIM  List Sizes follow :    3002  3000 10000   340 20000   1200
 13140 120000  460  900  360  900 36400   255 64800   384    45   254 120000 100000  3000 12000 40000   24 30000  3000   600 12600
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Descriptive interpretation of input data cards.   |  Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
                                                  0         1         2         3         4         5         6         7         8
1,23456789012345E+79
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C data:EXEMPLO1.DAT
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C         1         2         3         4         5         6         7         8
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678#
Marker card preceding new EMTP data case.         |BEGIN NEW DATA CASE
Disconnect disk file from I/O unit.               |$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
Connect disk file to I/O unit.                    |$OPEN, UNIT=4 FILE=EXEMPLO1.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN RECL=8000
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Ficheiro - exemplo1.dat
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Defini‡Æo de dados gerais reais
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C DELTAT     TMAX     XOPT     COPT   EPSILN   TOLMAT   TSTART
Misc. data.      5.000E-05    1.000E-01    0.000E+00 |  50.E-6 100.E-3    0.E+0    0.E+0      0.0      0.0      0.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Defini‡Æo de dados gerais inteiros
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C    IOUT    IPLOT   IDOUBL   KSSOUT   MAXOUT     IPUN   MEMSAV     ICAT   NENERG   IPRSUP
Misc. data.      20     1   1   1   1   0   0   1   0   0 |      20        1        1        1        1        0        0        1        0        0
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Defini‡Æo de dados dos ramos
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Impedancia da fonte
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R       L       C
Series R-L-C.    0.000E+00   2.809E-02   0.000E+00 |  NO1A   NO2A                   0.028.089    0.0                                0
Reference branch.    Copy   (NO1A   , NO2A    )   |  NO1B   NO2B   NO1A   NO2A                                                      0
Reference branch.    Copy   (NO1A   , NO2A    )   |  NO1C   NO2C   NO1A   NO2A                                                      0
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Linha em equivalente PI (sem acoplamentos)
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R       L       C       R       L       C       R       L       C
Begin coupled, lumped elements using [R], [L].    |  USE RL
1st of PI-ckt.     1.410E+00   8.334E-03   1.640E-07 | 1NO3A   NO4A                   1.41  8.334   .164
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 1.410E+00 8.334E-03 | 2NO3B   NO4B                                   1.41  8.334   .164
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 | 3NO3C   NO4C                                                   1.41  8.334   .1#
Blank card ending branches.   IBR, NTOT = 6   13  |BLANK CARD finalizando dados dos ramos
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Defini‡Æo dos dados dos interruptores
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Interruptor principal
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C BUS1   BUS2       TCLOSE      TOPEN        IE
Switch.   -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00 |  NO2A   NO3A        -1.0        1.1       0.0                                1
Switch.   -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00 |  NO2B   NO3B        -1.0        1.1       0.0                                1
Switch.   -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00 |  NO2C   NO3C        -1.0        1.1       0.0                                1
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
```

Listagem 3.2 - Ficheiro (exemplo1.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI sem acoplamentos (p1)

```
Comment card.    KOMPAR = 1.
Comment card.    KOMPAR = 1.
Comment card.    KOMPAR = 1.
Switch.    4.00E-02  1.00E+00  0.00E+00  0.00E+00
Blank card ending switches.    KSWTCH = 4.
Comment card.    KOMPAR = 1.
Comment card.    KOMPAR = 1.
Comment card.    KOMPAR = 1.
Comment card.    KOMPAR = 1.
Source.    3.43E+05  5.00E+01  0.00E+00 -1.00E+00
Source.    3.43E+05  5.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00
Source.    3.43E+05  5.00E+01 -2.40E+02 -1.00E+00
Blank card ends electric network sources.
```

```
|C Interruptor que cria o curto-circuito
|C
|C BUS1   BUS2        TCLOSE       TOPEN        IE
|   NO4A              40.E-3        1.0         0.0                                                    1
|BLANK CARD finalizando dados dos interruptores
|C
|C Defini‡Æo dos dados das fontes
|C
|C NAME      AMPLITUDE FREQUENCY      PHASE        A1                    TSTART      TSTOP
|14NO1A       342929.0      50.0        0.0                                -1.0
|14NO1B       342929.0      50.0     -120.0                                -1.0
|14NO1C       342929.0      50.0     -240.0                                -1.0
|BLANK CARD finalizando dados das fontes
```

```
List of input elements that are connected to each node.   Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive
and inductive coupling are ignored).   Repeated entries indicate parallel connections.   Switches are included,  although sources
(including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra,  internally-defined nodes  "UMXXXX".
--------------+------------------------------
From bus name |  Names of all adjacent busses.
--------------+------------------------------
        NO1A    |NO2A   *
        NO2A    |NO1A   *NO3A   *
        NO1B    |NO2B   *
        NO2B    |NO1B   *NO3B   *
        NO1C    |NO2C   *
        NO2C    |NO1C   *NO3C   *
        NO3A    |NO2A   *NO4A   *
        NO4A    |TERRA  *NO3A   *
        NO3B    |NO2B   *NO4B   *
        NO4B    |NO3B   *
        NO3C    |NO2C   *NO4C   *
        NO4C    |NO3C   *
        TERRA   |NO4A   *
--------------+------------------------------
```

```
Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch.   All flows are away from a bus,  and the real part,  magnitude,  or  "P"
is printed above the imaginary part,  the angle,  or  "Q".   The first solution frequency  =  5.00000000E+01  Hertz.
  Bus K                          Phasor  node  voltage                Phasor  branch  current                Power flow          Power loss
            Bus M          Rectangular                Polar          Rectangular                Polar              P  and  Q           P  and Q

 NO1A                          342929.                342929.      .32122133004E-3   17.677062000101      55.078054745203   -.298372438E-14
                                  0.0                    0.0      17.677061997183        89.9989588      -.30309885968E7       1378.7207932

            NO2A       343084.98981244   343084.98981244        -.32122133E-3   17.677062000101      -55.0780547452
                      -.0028345918023          -0.0000005      -17.67706199718       -90.0010412      .3032367317 61E7

 NO1B                        -171464.5            342929.      15.308624143165   17.677062000098      55.078054853974   .1136868377E-12
                      -296985.2256944        -120.0000000      -8.838809184422       -30.0010412      -.30309885968E7       1378.7207932

            NO2B        -171542.497361   343084.98981244      -15.30862414316   17.677062000098      -55.07805485397
                      -297120.3154174        -120.0000005      8.838809184422 4       149.9989588      .3032367317 61E7

 NO1C                        -171464.5            342929.       -15.3089453645   17.677062000103      55.078054665248                0.0
                      296985.22569439         120.0000000      -8.838252812761       -150.0010412      -.30309885968E7       1378.7207932
```

Listagem 3.2 - Ficheiro (exemplo1.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI sem acoplamentos (p2)

```
                NO2C      -171542.4924514   343084.98981244    15.308945364499   17.677062000103    -55.07805466525
                          297120.31825199       119.9999995     8.8382528127605      29.9989588    .303236731761E7

NO3A                      343084.98981244   343084.98981244    .32122132604E-3   17.677062000115     55.07805405867   55.078054125258
                          -.002834591802 3       -0.0000005    17.677061997196      89.9989588    -.303236731 76E7 -3032367.3176129

                NO4A      343108.13121122   343108.1314377     .3884430212E-12   .8251443932E-11    .66587603571E-7
                          -12.46642441498        -0.0020818    .8242295735E-11      87.3017602    -.1414001764E-5

NO3B                       -171542.497361   343084.98981244    15.308624143178   17.677062000112    55.078054342152   55.07805412523
                          -297120.3154174       -120.0000005    -8.838809184427      -30.0010412    -.303236731 76E7 -3032367.3176129

                NO4B      -171564.8618458   343108.1314377     .1018918283E-10   .1110781314E-10    -.2169216603E-6
                          -297134.1246617       -120.0020818    -.442312853E-11      -23.4656849    -.1893203678E-5

NO3C                      -171542.4924514   343084.98981244    -15.30894536451   17.677062000108    55.078055442447   55.078054125136
                          297120.31825199       119.9999995    -8.838252812759      -150.0010412    -.303236731 76E7 -3032367.3176129

                NO4C      -171543.2693654   343108.1314377     -.966071667E-11   .1737658766E-10    -.131731147E-5
                          297146.59108613       119.9979182    -.144435575E-10      -123.7769777    -.2674172047E-5
      Total network loss   P-loss   by summing injections =    1.65234162 6027E+02

Output for steady-state phasor switch currents.
      Node-K     Node-M          I-real            I-imag            I-magn          Degrees          Power          Reactive
      NO2A       NO3A        3.21221330E-04    1.76770620E+01    1.76770620E+01    89.9990    5.50780547E+01    -3.03236732E+06
      NO2B       NO3B        1.53086241E+01   -8.83880918E+00    1.76770620E+01   -30.0010    5.50780552E+01    -3.03236732E+06
      NO2C       NO3C       -1.53089454E+01   -8.83825281E+00    1.76770620E+01  -150.0010    5.50780545E+01    -3.03236732E+06
      NO4A                        Open              Open              Open          Open          Open              Open

Solution at nodes with known voltage.   Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed
result applying to the composite group.   The entry "MVA" is  SQRT( P**2 + Q**2 )  in units of power,  while  "P.F."  is the
associated power factor.
                Node                Source  node  voltage                Injected  source  current                Injected  source  power
                name          Rectangular              Polar          Rectangular              Polar                P  and  Q    MVA and P.F.

                NO1A              342929.              342929.      .32122133004E-3   17.677062000105    55.078054745203   .303098859732E7
                                    0.0                  0.0       17.677061997187      89.9989588    -.30309885968E7          0.0000182

                NO1B            -171464.5              342929.      15.308624143163   17.677062000098    55.078055174723   .303098859732E7
                          -296985.2256944       -120.0000000      -8.838809184424      -30.0010412    -.30309885968E7          0.0000182

                NO1C            -171464.5              342929.       -15.3089453645    17.6770620001    55.078054464096   .303098859732E7
                          296985.22568439        120.0000000       -8.83825281276      -150.0010412    -.30309885968E7          0.0000182
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Defini‡Æo das vari veis de sa|da (tensÆo dos n¢s)
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4   BUS5   BUS6
Card of names for time-step loop output.              |   NO3A   NO3B   NO3C   NO4A   NO4B   NO4C
Blank card ending requests for output variables.      |BLANK CARD finalizando defini‡Æo das vari veis de sa|da

Column headings for the  10   EMTP output variables follow.  These are divided among the 5 possible classes as follows ....
  First   6      output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
  Next    4      output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);
   Step       Time       NO3A       NO3B       NO3C       NO4A       NO4B       NO4C       NO2A       NO2B       NO2C       NO4A
                                                                                          NO3A       NO3B       NO3C       TERRA
```

Listagem 3.2 - Ficheiro (exemplo1.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI sem acoplamentos (p3)

```
***     Phasor I(0) =  3.2122133E-04                    Switch  "NO2A  "  to  "NO3A  "  closed in the steady-state.
***     Phasor I(0) =  1.5308624E+01                    Switch  "NO2B  "  to  "NO3B  "  closed in the steady-state.
***     Phasor I(0) = -1.5308945E+01                    Switch  "NO2C  "  to  "NO3C  "  closed in the steady-state.
```

0	0.0	343084.99	-171542.5	-171542.49	343108.131	-171564.86	-171543.27	.321221E-3	15.3086241	-15.308945		0.0
20	.1E-2	326293.219	-71331.492	-254961.73	326319.08	-71348.51	-254970.57	-5.4623056	17.2909041	-11.828599		0.0
40	.002	277561.597	35862.036	-313423.63	277587.647	35852.0457	-313439.69	-10.390257	17.5807746	-7.1905178		0.0
60	.003	201660.31	139545.237	-341205.55	201683.997	139543.267	-341227.26	-14.30115	16.14957	-1.8484204		0.0
80	.004	106019.1	229568.774	-335587.87	106038.106	229575.019	-335613.12	-16.812146	13.1372482	3.67489749		0.0
100	.005	-.60159E-3	297120.421	-297120.42	12.4626844	297134.252	-297146.71	-17.677439	8.83882887	8.83860988		0.0
120	.006	-106019.1	335587.757	-229568.66	-106014.4	335607.805	-229593.41	-16.812329	3.67535663	13.1369724		0.0
140	.007	-201660.3	341205.433	-139545.13	-201663.82	341229.736	-139565.91	-14.301513	-1.8476058	16.1491186		0.0
160	.008	-277561.59	313423.643	-35862.056	-277572.98	313449.838	-35876.855	-10.390778	-7.1895921	17.5803698		0.0
180	.009	-326293.21	254961.854	71331.3608	-326311.37	254987.392	71323.98	-5.4629323	-11.827971	17.2909031		0.0
200	.01	-343084.99	171542.61	171542.384	-343108.14	171564.989	171543.147	-.33521E-3	-15.308819	15.3091541		0.0
220	.011	-326293.23	71331.4798	254961.746	-326319.09	71348.4944	254970.593	5.4623077	-17.291241	11.8289332		0.0
240	.012	-277561.6	-35862.158	313423.758	-277587.65	-35852.188	313439.837	10.3902727	-17.58091	7.19063731		0.0
260	.013	-201660.31	-139545.34	341205.648	-201683.99	-139543.38	341227.382	14.301163	-16.14937	1.84820675		0.0
280	.014	-106019.09	-229568.76	335587.85	-106038.1	-229575.	335613.095	16.8121429	-13.136921	-3.6752221		0.0
300	.015	.002868153	-297120.3	297120.298	-12.460024	-297134.11	297146.569	17.6774229	-8.8387097	-8.8387132		0.0
320	.016	106019.093	-335587.66	229568.565	106014.391	-335607.69	229593.295	16.8123164	-3.6755648	-13.136752		0.0
340	.017	201660.295	-341205.46	139545.162	201683.814	-341229.76	139565.947	14.3015161	1.84728577	-16.148802		0.0
360	.018	277561.585	-313423.77	35862.181	277572.981	-313449.98	35876.9978	10.3907935	7.18948729	-17.580281		0.0
380	.019	326293.219	-254961.95	-71331.269	326311.377	-254987.5	-71323.875	5.46294432	11.8281859	-17.29113		0.0
400	.02	343085.	-171542.58	-171542.42	343108.143	-171564.96	-171543.19	.33127E-3	15.309132	-15.309463		0.0
420	.021	326293.228	-71331.358	-254961.87	326319.09	-71348.354	-254970.74	-5.4623234	17.2913332	-11.82901		0.0
440	.022	277561.595	35862.2496	-313423.85	277587.644	35852.2919	-313439.94	-10.390284	17.5806909	-7.1904069		0.0
460	.023	201660.299	139545.312	-341205.61	201683.985	139543.352	-341227.34	-14.301159	16.1490664	-1.8479079		0.0
480	.024	106019.092	229568.638	-335587.73	106038.096	229574.856	-335612.95	-16.812127	13.1368431	3.67528425		0.0
500	.025	.001810603	297120.216	-297120.22	12.4654495	297134.009	-297146.47	-17.677412	8.83893405	8.83847821		0.0
520	.026	-106019.09	335587.695	-229568.61	-106014.38	335607.727	-229593.34	-16.812321	3.6758593	13.1364621		0.0
540	.027	-201660.29	341205.577	-139545.28	-201663.81	341229.899	-139566.09	-14.301532	-1.847222	16.1487536		0.0
560	.028	-277561.59	313423.847	-35862.257	-277572.99	313450.072	-35877.085	-10.390804	-7.189717	17.5805205		0.0
580	.029	-326293.22	254961.909	71331.3154	-326311.38	254987.456	71323.9275	-5.4629388	-11.828473	17.2914114		0.0
600	.03	-343085.	171542.463	171542.538	-343108.14	171564.821	171543.323	-.31602E-3	-15.309184	15.3095001		0.0
620	.031	-326293.22	71331.2819	254961.941	-326319.08	71348.2678	254970.816	5.46233274	-17.291101	11.8287681		0.0
640	.032	-277561.59	-35862.207	313423.797	-277587.64	-35852.24	313439.878	10.390278	-17.580414	7.19013619		0.0
660	.033	-201660.3	-139545.2	341205.495	-201683.98	-139543.22	341227.199	14.3011435	-16.149027	1.8478839		0.0
680	.034	-106019.1	-229568.57	335587.665	-106038.1	-229574.77	335612.876	16.8121187	-13.137079	-3.6750402		0.0
700	.035	-.00717901	-297120.26	297120.271	-12.471702	-297134.06	297146.535	17.6774187	-8.8392008	-8.8382179		0.0
720	.036	106019.087	-335587.81	229568.724	106014.384	-335607.86	229593.477	16.8123363	-3.6758853	-13.136451		0.0
740	.037	201660.299	-341205.64	139545.343	201663.818	-341229.97	139566.157	14.3015396	1.84746097	-16.149001		0.0
760	.038	277561.595	-313423.8	35862.2	277572.992	-313450.01	35877.0213	10.3907967	7.18997516	-17.580772		0.0
780	.039	326293.225	-254961.79	-71331.43	326311.384	-254987.32	-71324.059	5.46292419	11.8284875	-17.291412		0.0
***						Close switch "NO4A " to "			" after 4.00000000E-02 sec.			
800	.04	343084.996	-171542.4	-171542.59	343108.138	-171564.75	-171543.39	.308587E-3	15.3089437	-15.309252		0.0
820	.041	195868.438	-71331.335	-254961.88	0.0	-71348.331	-254970.75	8746.30355	17.2908527	-11.828527	8097.4517	
840	.042	-60866.944	35862.0956	-313423.69	0.0	35852.1101	-313439.75	16635.181	17.5804107	-7.190147	15832.2236	
860	.043	2003.79389	139545.141	-341205.44	0.0	139543.151	-341227.14	22692.7274	16.1492689	-1.8481322	21037.1077	
880	.044	204232.383	229568.625	-335587.73	0.0	229574.839	-335612.95	25919.7888	13.1373161	3.67481016	24628.9412	
900	.045	54458.8005	297120.374	-297120.38	0.0	297134.19	-297146.66	26203.5112	8.83919245	8.83824032	25623.6737	
920	.046	-147927.86	335587.861	-229568.77	0.0	335607.92	-229593.53	23875.4234	3.67564191	13.1367005	22770.7222	
940	.047	-11718.136	341205.582	-139545.28	0.0	341229.907	-139566.08	18907.7035	-1.8476893	16.149221	17267.829	
960	.048	86498.8776	313423.687	-35862.092	0.0	313449.889	-35876.898	11540.0611	-7.1899566	17.5807395	10531.4475	
980	.049	-119771.55	254961.748	71331.4715	0.0	254987.272	71324.1057	2823.15811	-11.828244	17.2911625	2156.53187	
1000	.05	-202358.54	171542.463	171542.528	0.0	171564.824	171543.31	-6217.2785	-15.308725	15.3090421	-7567.1223	

Listagem 3.2 - Ficheiro (exemplo1.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI sem acoplamentos (p4)

1020	.051	-15572.877	71331.44	254961.778	0.0	71348.4531	254970.626	-15027.253	-17.290881	11.8285692	-16525.708
1040	.052	2767.76549	-35862.054	313423.649	0.0	-35852.062	313439.706	-22799.471	-17.580654	7.19039512	-23617.728
1060	.053	-171366.08	-139545.21	341205.513	0.0	-139543.23	341227.22	-28425.454	-16.149476	1.84833128	-29279.288
1080	.054	-119990.68	-229568.73	335587.829	0.0	-229574.96	335613.065	-31370.594	-13.137277	-3.6748624	-32857.475
1100	.055	70218.0711	-297120.41	297120.412	0.0	-297134.23	297146.699	-31649.827	-8.8389491	-8.838488	-32942.283
1120	.056	23851.8405	-335587.79	229568.698	0.0	-335607.84	229593.45	-29123.621	-3.6754441	-13.13689	-29870.215
1140	.057	-86298.941	-341205.48	139545.179	0.0	-341229.79	139565.969	-23763.635	1.84764096	-16.14916	-24833.4
1160	.058	43621.9441	-313423.65	35862.0646	0.0	-313449.85	35876.8664	-16252.806	7.18971405	-17.580493	-17753.931
1180	.059	167404.609	-254961.82	-71331.4	0.0	-254987.35	-71324.022	-7528.2031	11.8280559	-17.290984	-8613.866
1200	.06	56617.1707	-171542.56	-171542.43	0.0	-171564.94	-171543.2	1773.54065	15.3087822	-15.309112	988.919409
1220	.061	-2552.2057	-71331.468	-254961.76	0.0	-71348.485	-254970.6	10892.4316	17.2911219	-11.828813	9640.67552
1240	.062	129016.025	35862.124	-313423.72	0.0	35852.1433	-313439.79	18707.9239	17.580831	-7.1905631	17293.5944
1260	.063	144946.34	139545.3	-341205.61	0.0	139543.336	-341227.33	24386.3244	16.1494105	-1.8482531	23455.1623
1280	.064	-6790.9381	229568.751	-335587.85	0.0	229574.987	-335613.09	27618.3313	13.1370377	3.67510441	26718.0306
1300	.065	-21919.849	297120.338	-297120.34	0.0	297134.151	-297146.61	28102.8626	8.83878197	8.83864581	26740.6029
1320	.066	74526.9557	335587.701	-229568.61	0.0	335607.737	-229593.34	25569.5084	3.67551837	13.1368036	24297.153
1340	.067	7255.20822	341205.462	-139545.16	0.0	341229.768	-139565.95	20321.6031	-1.8474035	16.1489202	19461.7367
1360	.068	-124117.92	313423.727	-35862.14	0.0	313449.936	-35876.854	13080.9467	-7.1895566	17.5803452	12030.6526
1380	.069	-80081.098	254961.906	71331.3119	0.0	254987.455	71323.9206	4462.64167	-11.828138	17.2910765	3071.88219
1400	.07	-10582.695	171542.577	171542.421	0.0	171564.955	171543.186	-4850.4657	-15.309017	15.3093478	-5975.7008
1420	.071	-98658.733	71331.3945	254961.832	0.0	71348.3996	254970.689	-13806.493	-17.291269	11.8289505	-14680.248
1440	.072	-153372.78	-35862.21	313423.807	0.0	-35852.244	313439.89	-21402.745	-17.580742	7.19046296	-22592.47
1460	.073	-49997.485	-139545.31	341205.612	0.0	-139543.35	341227.337	-27049.968	-16.149179	1.84802013	-28397.223
1480	.074	-944.10432	-229568.68	335587.769	0.0	-229574.9	335612.998	-30264.915	-13.136901	-3.6752316	-31275.559
1500	.075	-71685.136	-297120.25	297120.255	0.0	-297134.05	297146.519	-30560.402	-8.8388783	-8.8385389	-31509.904
1520	.076	-49187.513	-335587.69	229568.604	0.0	-335607.73	229593.341	-27877.18	-3.6757474	-13.136574	-29160.182
1540	.077	88760.646	-341205.54	139545.242	0.0	-341229.86	139566.042	-22639.538	1.84727607	-16.148803	-23895.09
1560	.078	75327.0388	-313423.81	35862.2189	0.0	-313450.03	35877.0448	-15339.084	7.18965906	-17.580458	-16287.323
1580	.079	15700.2079	-254961.91	-71331.313	0.0	-254987.46	-71323.922	-6535.5912	11.8283628	-17.291302	-7587.7275
1600	.08	67966.5915	-171542.5	-171542.5	0.0	-171564.87	-171543.28	2857.36443	15.3091342	-15.309455	1543.31965
1620	.081	139757.308	-71331.317	-254961.91	0.0	-71348.309	-254970.78	11795.1047	17.2911603	-11.828832	10647.2706
1640	.082	84114.678	35862.21	-313423.8	0.0	35852.2445	-313439.88	19490.7159	17.5805204	-7.1902418	18548.5433
1660	.083	24503.1151	139545.234	-341205.53	0.0	139543.261	-341227.25	25293.1853	16.149071	-1.8479225	24143.2872
1680	.084	68382.3146	229568.602	-335587.7	0.0	229574.814	-335612.91	28532.0399	13.1370153	3.67510771	27242.9291
1700	.085	74275.0571	297120.258	-297120.26	0.0	297134.058	-297146.53	28826.4277	8.8390959	8.83832199	27769.7467
1720	.086	-19015.115	335587.771	-229568.68	0.0	335607.817	-229593.43	26266.4919	3.67584572	13.1364855	25282.2151
1740	.087	-57601.834	341205.609	-139545.31	0.0	341229.938	-139566.12	21138.3327	-1.8473956	16.1489311	19916.8695
1760	.088	-17642.605	313423.801	-35862.208	0.0	313450.022	-35877.032	13828.4004	-7.1898722	17.5806699	12599.2709
1780	.089	-44545.519	254961.833	71331.391	0.0	254987.37	71324.0131	5053.76554	-11.828452	17.2913808	4049.42682
1800	.09	-118360.06	171542.433	171542.564	0.0	171564.787	171543.353	-4212.9959	-15.30901	15.3093224	-5268.6518
1820	.091	-102989.43	71331.3274	254961.892	0.0	71348.3208	254970.76	-13090.302	-17.290952	11.8286252	-14345.891
1840	.092	-49229.516	-35862.133	313423.724	0.0	-35852.155	313439.794	-20804.899	-17.580441	7.19017234	-21962.441
1860	.093	-71126.412	-139545.17	341205.472	0.0	-139543.19	341227.174	-26548.458	-16.1492	1.8480596	-27544.236
1880	.094	-92254.904	-229568.61	335587.714	0.0	-229574.83	335612.934	-29677.735	-13.137219	-3.6749058	-30808.648
1900	.095	-27073.038	-297120.33	297120.341	0.0	-297134.15	297146.618	-29952.95	-8.8391665	-8.8382613	-31202.778
1920	.096	26701.529	-335587.83	229568.742	0.0	-335607.89	229593.5	-27402.335	-3.6757129	-13.136626	-28495.169
1940	.097	8548.73312	-341205.59	139545.291	0.0	-341229.92	139566.098	-22194.79	1.84759431	-16.149128	-23216.085
1960	.098	20436.626	-313423.72	35862.1306	0.0	-313449.93	35876.9419	-14804.942	7.18993394	-17.580722	-15992.282
1980	.099	87617.5255	-254961.77	-71331.446	0.0	-254987.3	-71324.078	-6037.5664	11.8283153	-17.291237	-7249.1882

% % % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.

2000	0.1	102372.528	-171542.45	-171542.54	0.0	-171564.81	-171543.33	3240.40683	15.3088166	-15.309132	2192.43061	

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

Variable maxima :	343085.	343080.396	343080.383	343108.143	343103.489	343103.603	29083.9838	17.6774573	17.67741	30308.5834	

Listagem 3.2 - Ficheiro (exemplo1.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI sem acoplamentos (p5)

```
Times of maxima :          .02      .02665      .03335          .02      .02665      .03335      .08455      .00165      .00835      .08465
Variable minima :     -343085.  -343080.37  -343080.38  -343108.14  -343103.46   -343103.6  -32026.539  -17.677412  -17.677395  -33355.982
Times of minima :          .03      .07665      .02335          .03      .07665      .02335       .0545      .05165      .05835       .0546

Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Defini‡Æo das sa¡das para plotter
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Blank card terminating all plot cards.                |BLANK CARD finalizando defini‡Æo das sa¡das para plotter
Actual List Sizes for the preceding solution follow.        28-Sep-96  11.31.22
   Size  1-10:     13      6      7      3     30      4     12      0      0      0
   Size 11-20:      0     10  -9999  -9999  -9999      0      0      0     23      0
   Size 21-29:      0      0     33      0  -9999  -9999  -9999  -9999  -9999
Seconds for overlays  1-5   :      5.824      0.000      5.824   -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays  6-11  :      0.330      0.000      0.330
Seconds for overlays 12-15  :      0.385      0.000      0.385
Seconds for time-step loop  :      0.714      0.000      0.714
Seconds after DELTAT-loop   :      0.055      0.000      0.055
                                 ---------------------------
                    Totals  :      7.308      0.000      7.308

Disconnect disk file from I/O unit.                   |$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
```

Listagem 3.2 - Ficheiro (exemplo1.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI sem acoplamentos (p6)

Anexo B

Listagem 3.4

```
   ---    69    cards of disk file read into card cache cells  1    onward.
Alternative Transients Program (ATP), Salford 80386 translation.  All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 28-Sep-96  11.31.47    Name of disk plot file, if any, is  C:EXEMPLO2.pl4
Consult the 800-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTP User Group in Portland,  Oregon, USA.   Program is no older than July, 1993.
Total size of LABCOM tables =  2003949   INTEGER words.   VARDIM  List Sizes follow :    3002  3000 10000   340 20000  1200
 13140 120000  460  900  360  900 36400   255 64800   384    45   254 120000 100000  3000 12000 40000   24 30000  3000   600 126000
-----------------------------------------------------+-----------------------------------------------------------------------------------
Descriptive interpretation of input data cards.      |  Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
                                                     0         1         2         3         4         5         6         7         8
1,23456789012345E+79
-----------------------------------------------------+-----------------------------------------------------------------------------------
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C data:EXEMPLO2.DAT
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C         1         2         3         4         5         6         7         8
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
Marker card preceding new EMTP data case.            |BEGIN NEW DATA CASE
Disconnect disk file from I/O unit.                  |$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
Connect disk file to I/O unit.                       |$OPEN, UNIT=4 FILE=EXEMPLO2.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN RECL=8000
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C Ficheiro - exemplo2.dat
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C Defini‡Æo de dados gerais reais
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C DELTAT    TMAX    XOPT    COPT  EPSILN  TOLMAT  TSTART
Misc. data.      5.000E-05   1.000E-01   0.000E+00  |  50.E-6 100.E-3   0.E+0   0.E+0     0.0     0.0     0.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C Defini‡Æo de dados gerais inteiros
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C   IOUT   IPLOT  IDOUBL  KSSOUT  MAXOUT    IPUN  MEMSAV    ICAT  NENERG  IPRSUP
Misc. data.      20    1  1  1  1  0  0  1  0  0     |      20       1       1       1       1       0       0       1       0       0
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C Defini‡Æo de dados dos ramos
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C Impedancia da fonte
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C BUS1  BUS2  BUS3  BUS4       R      L      C
Series R-L-C.    0.000E+00  2.809E-02  0.000E+00     |  NO1A  NO2A                 0.028.089   0.0                                  0
Reference branch.   Copy  (NO1A   , NO2A    )        |  NO1B  NO2B  NO1A  NO2A                                                      0
Reference branch.   Copy  (NO1A   , NO2A    )        |  NO1C  NO2C  NO1A  NO2A                                                      0
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C Linha em equivalente PI (com acoplamentos)
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C BUS1  BUS2  BUS3  BUS4       R      L      C      R      L      C      R      L      C
Begin coupled, lumped elements using [R], [L].       |  USE RL
1st of PI-ckt.     1.410E+00  8.334E-03  1.640E-07  | 1NO3A  NO4A                 1.41 8.334  .164
 9.700E-01 2.859E-03-2.890E-08 1.230E+00 9.139E-03| 2NO3B  NO4B                 0.972.8586-.0289  1.239.1392 .1626
 9.100E-01 2.282E-03-8.800E-09 8.600E-01 3.422E-03| 3NO3C  NO4C                 0.912.2823-.0088  0.863.4218-.0273  1.16 9.518 .1662
Blank card ending branches.  IBR, NTOT = 6  13      |BLANK CARD finalizando dados dos ramos
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C Defini‡Æo dos dados dos interruptores
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C Interruptor principal
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C BUS1  BUS2      TCLOSE     TOPEN        IE
Switch.   -1.00E+00  8.00E-02  0.00E+00  0.00E+00   |  NO2A  NO3A        -1.0    80.E-3       0.0                                  1
Switch.   -1.00E+00  8.00E-02  0.00E+00  0.00E+00   |  NO2B  NO3B        -1.0    80.E-3       0.0                                  1
Switch.   -1.00E+00  8.00E-02  0.00E+00  0.00E+00   |  NO2C  NO3C        -1.0    80.E-3       0.0                                  1
Comment card.    KOMPAR = 1.                         |C
```

Listagem 3.4 - Ficheiro (exemplo2.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI com acoplamentos (p1)

```
Comment card.    KOMPAR = 1.                                  |C Interruptor que cria o curto-circuito
Comment card.    KOMPAR = 1.                                  |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                                  |C BUS1   BUS2        TCLOSE      TOPEN          IE
Switch.    4.00E-02  1.00E+00  0.00E+00  0.00E+00             |   NO4A              40.E-3        1.0         0.0                                                    1
Blank card ending switches.    KSWTCH = 4.                    |BLANK CARD finalizando dados dos interruptores
Comment card.    KOMPAR = 1.                                  |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                                  |C Defini‡Æo dos dados das fontes
Comment card.    KOMPAR = 1.                                  |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                                  |C NAME      AMPLITUDE FREQUENCY      PHASE          A1                    TSTART      TSTOP
Source.    3.43E+05  5.00E+01  0.00E+00 -1.00E+00             |14NO1A       342929.0        50.0        0.0                                 -1.0
Source.    3.43E+05  5.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00             |14NO1B       342929.0        50.0     -120.0                                 -1.0
Source.    3.43E+05  5.00E+01 -2.40E+02 -1.00E+00             |14NO1C       342929.0        50.0     -240.0                                 -1.0
Blank card ends electric network sources.                     |BLANK CARD finalizando dados das fontes

List of input elements that are connected to each node.   Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive
and inductive coupling are ignored).   Repeated entries indicate parallel connections.   Switches are included,  although sources
(including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra,  internally-defined nodes  "UMXXXX".
--------------+-------------------------------
From bus name |  Names of all adjacent busses.
--------------+-------------------------------
        NO1A    |NO2A   *
        NO2A    |NO1A   *NO3A   *
        NO1B    |NO2B   *
        NO2B    |NO1B   *NO3B   *
        NO1C    |NO2C   *
        NO2C    |NO1C   *NO3C   *
        NO3A    |NO2A   *NO4A   *
        NO4A    |TERRA  *NO3A   *
        NO3B    |NO2B   *NO4B   *
        NO4B    |NO3B   *
        NO3C    |NO2C   *NO4C   *
        NO4C    |NO3C   *
        TERRA   |NO4A   *
--------------+-------------------------------

Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch.   All flows are away from a bus,  and the real part,  magnitude,  or  "P
is printed above the imaginary part,  the angle,  or  "Q".   The first solution frequency  =  5.00000000E+01  Hertz.
  Bus K                          Phasor  node  voltage                Phasor  branch  current                Power flow        Power loss
            Bus M          Rectangular                Polar            Rectangular                Polar              P  and  Q         P  and  Q

 NO1A                          342929.                342929.       -1.877112198196  19.798965033086        -321858.104679   .1750777301E-10
                                   0.0                    0.0       19.709780977296        95.4403038       -.33795277404E7       1729.5819026

            NO2A       343102.92737766  343102.92777751        1.877112199195 8  19.798965033086        321858.10467901
                       16.564425690748          0.0027661        -19.7097809773        -84.5596962       .338125732228E7

 NO1B                       -171464.5            342929.        17.72773384911    20.55709364106        25637.560419249   -.454747351E-12
                       -296985.2256944      -120.0000000       -10.40776400301        -30.4167420       -.35247185446E7       1864.5738259

            NO2B       -171556.3424767  343110.39962418       -17.72773384911    20.55709364106        -25637.56041925
                       -297141.6626565     -120.0002203       10.407764003014        149.5832580       .352658311839E7

 NO1C                       -171464.5            342929.       -18.06384838274  19.935752211009        296274.34316068    .397903932E-11
                       296985.22569439      120.0000000       -8.433955052292       -154.9722745       -.34054099875E7       1753.5631446
```

Listagem 3.4 - Ficheiro (exemplo2.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI com acoplamentos (p2)

```
          NO2C      -171538.9247583  343104.25974618     18.063848382741  19.935752211009     -296274.3431607
                     297144.6286722      119.9974537     8.4339550522916       25.0277255     .340716355061E7

NO3A                343102.92737766  343102.92777751     -1.877112199196  19.798965033099     -321858.1046791  -321858.1046792
                    16.564425690746        0.0027661     19.709780977309       95.4403038     -.33812573223E7 -3381257.3222851

          NO4A       343121.9774747  343121.97770337     -.932365296E-12   .725793358E-11     -.1600025957E-6
                    12.527058268471        0.0020918     -.719779791E-11      -97.3806994     .12348554868E-5

NO3B                -171556.3424767  343110.39962418     17.727733849131  20.55709364108     25637.560417833   25637.56041604
                    -297141.6626565     -120.0002203     -10.40776400302      -30.4167420     -.35265831184E7 -3526583.1183921

          NO4B      -171569.1917937  343129.32080307     .1186428733E-10  .1295999772E-10     -.1792664612E-5
                    -297156.0923522     -120.0008737      .521538368E-11       23.7296551     -.1315373049E-5

NO3C                -171538.9247583  343104.25974618     -18.06384838275  19.935752211015     296274.34316241  296274.34316425
                     297144.6286722      119.9974537     -8.433955052285     -154.9722745     -.34071635506E7 -3407163.5506018

          NO4C      -171546.3542922  343124.04029604     .1633360114E-10  .2726247529E-10     .18422351859E-5
                    297163.17968105      119.9969794     .2182787284E-10       53.1928210     .4299118429E-5
     Total network loss  P-loss  by summing injections =   5.379890417097E+01

Output for steady-state phasor switch currents.
      Node-K    Node-M          I-real          I-imag          I-magn          Degrees        Power          Reactive
      NO2A      NO3A       -1.87711220E+00   1.97097810E+01   1.97989650E+01    95.4403   -3.21858105E+05   -3.38125732E+06
      NO2B      NO3B        1.77277338E+01  -1.04077640E+01   2.05570936E+01   -30.4167    2.56375604E+04   -3.52658312E+06
      NO2C      NO3C       -1.80638484E+01  -8.43395505E+00   1.99357522E+01  -154.9723    2.96274343E+05   -3.40716355E+06
      NO4A                     Open            Open            Open            Open          Open            Open

Solution at nodes with known voltage.   Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed
result applying to the composite group.   The entry "MVA" is  SQRT( P**2 + Q**2 )  in units of power,  while  "P.F."  is the
associated power factor.
            Node                Source  node  voltage              Injected  source  current              Injected  source  power
            name          Rectangular            Polar          Rectangular            Polar            P  and  Q    MVA and P.F.

            NO1A            342929.          342929.      -1.877112199196  19.798965033086     -321858.104679  .339481963992E7
                                0.0              0.0      19.709780977297       95.4403038     -.33795277404E7       -0.0948086

            NO1B           -171464.5          342929.      17.727733849108  20.557093641059     25637.560419474  .352481178262E7
                    -296985.2256944     -120.0000000     -10.40776400301      -30.4167420     -.35247185446E7        0.0072735

            NO1C           -171464.5          342929.      -18.06384838275  19.935752211012     296274.34316113  .341827378499E7
                    296985.22569439      120.0000000     -8.433955052291     -154.9722745     -.34054099875E7        0.0866737
Comment card.   KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.   KOMPAR = 1.                          |C Defini‡Æo das vari veis de sa¡da (tensÆo dos n¢s)
Comment card.   KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.   KOMPAR = 1.                          |C BUS1  BUS2  BUS3  BUS4  BUS5  BUS6
Card of names for time-step loop output.             |  NO3A  NO3B  NO3C  NO4A  NO4B  NO4C
Blank card ending requests for output variables.     |BLANK CARD finalizando defini‡Æo das vari veis de sa¡da

Column headings for the  10   EMTP output variables follow.  These are divided among the 5 possible classes as follows ....
  First   6     output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
  Next    4     output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);
   Step      Time      NO3A      NO3B      NO3C      NO4A      NO4B      NO4C      NO2A      NO2B      NO2C      NO4A
                                                                                   NO3A      NO3B      NO3C      TERRA
```

Listagem 3.4 - Ficheiro (exemplo2.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI com acoplamentos (p3)

```
***     Phasor I(0) = -1.8771122E+00                    Switch  "NO2A  "  to  "NO3A  "  closed in the steady-state.
***     Phasor I(0) =  1.7727734E+01                    Switch  "NO2B  "  to  "NO3B  "  closed in the steady-state.
***     Phasor I(0) = -1.8063848E+01                    Switch  "NO2C  "  to  "NO3C  "  closed in the steady-state.
   0      0.0  343102.927 -171556.34 -171538.92 343121.977 -171569.19 -171546.35 -1.8771122 17.7277338 -18.063848          0.0
  20    .1E-2   326305.11 -71337.961 -254965.91 326324.471 -71345.719 -254978.71 -7.8759105 20.0763681 -14.573448          0.0
  40     .002  277566.318 35863.5052 -313435.07   277584.1 35861.5928 -313451.97 -13.103787 20.4596275 -9.6566094          0.0
  60     .003  201657.397 139554.353 -341223.08 201671.853  139558.47 -341242.45 -17.048885 18.8402155 -3.7944205          0.0
  80     .004  106008.906 229584.699 -335609.77 106018.639 229594.459 -335629.71 -19.325196 15.3765154 2.43924156          0.0
 100     .005   -16.52245 297141.642 -297144.69 -12.481934 297156.063 -297163.25 -19.709876 10.4076268 8.43423843          0.0
 120     .006  -106040.31  335612.34 -229592.95 -106042.35 335630.034  -229608.3 -18.165206 4.41998228 13.6037395          0.0
 140     .007   -201684.2 341230.923 -139567.04 -201692.13 341250.149 -139577.69 -14.842439 -2.0004364 17.4415666          0.0
 160     .008  -277585.83 313447.472 -35879.307 -277598.87 313466.346 -35884.196  -10.06662 -8.2249631 19.5721251          0.0
 180     .009  -326315.43 254981.591 71320.5411  -326332.3 254998.272 71321.8865 -4.3054113 -13.644534 19.7866885          0.0
 200      .01  -343102.99 171556.313 171539.004 -343122.04 171569.162 171546.441 1.87740021 -17.728401 18.0644373          0.0
 220     .011  -326305.17  71337.943 254966.025 -326324.54 71345.7039 254978.836 7.87638255 -20.077008 14.5738849          0.0
 240     .012  -277566.35 -35863.537 313435.146 -277584.14 -35861.631 313452.062 13.1043705 -20.460318 9.65685841          0.0
 260     .013  -201657.36  -139554.4 341223.094 -201671.82 -139558.52 341242.467 17.0495509 -18.840859 3.79464664          0.0
 280     .014  -106008.81 -229584.74  335609.74 -106018.53 -229594.51 335629.672 19.3257479 -15.377191 -2.4389655          0.0
 300     .015  16.6343016  -297141.7 297144.626 12.6035245 -297156.14 297163.178 19.7102943 -10.408256 -8.4337724          0.0
 320     .016  106040.412 -335612.39 229592.934 106042.462 -335630.09 229608.285 18.1654579 -4.4206189 -13.603134          0.0
 340     .017  201684.225  -341231. 139567.086 201692.156 -341250.23 139577.737 14.8426439 1.99981343 -17.440912          0.0
 360     .018  277585.822 -313447.53  35879.427 277598.859 -313466.41 35884.3365 10.0669111 8.22435279 -19.571549          0.0
 380     .019  326315.389 -254981.67 -71320.407 326332.256 -254998.35 -71321.735 4.30583313  13.643891 -19.786303          0.0
 400      .02  343102.986 -171556.39 -171538.89 343122.047 -171569.24 -171546.32  -1.876808 17.7277949 -18.064186          0.0
 420     .021  326305.237 -71338.025 -254965.98 326324.609 -71345.798 -254978.78 -7.8757811 20.0763628 -14.573715          0.0
 440     .022  277566.474 35863.4379 -313435.16  277584.27 35861.5222 -313452.08 -13.103822 20.4597234 -9.6565799          0.0
 460     .023  201657.513 139554.302 -341223.11 201671.987 139558.414 -341242.49 -17.049191  18.840251 -3.7942271          0.0
 480     .024  106008.918 229584.633 -335609.73 106018.649 229594.381 -335629.67 -19.325518 15.3766186 2.43954526          0.0
 500     .025  -16.565322 297141.609 -297144.54 -12.529094 297156.038 -297163.08 -19.710119  10.407688 8.43439148          0.0
 520     .026  -106040.41 335612.277 -229592.79 -106042.46 335629.963 -229608.13 -18.165216 4.42004566  13.603654          0.0
 540     .027  -201684.23 341230.893 -139566.92 -201692.15 341250.117 -139577.54  -14.84223 -2.0003652 17.4412744          0.0
 560     .028  -277585.79 313447.405 -35879.295 -277598.83 313466.276 -35884.186  -10.06639 -8.2249384 19.5717336          0.0
 580     .029   -326315.3 254981.541 71320.4801 -326332.15 254998.215 71321.8148 -4.3052465 -13.644431  19.786461          0.0
 600      .03  -343102.83 171556.258 171538.911 -343121.87 171569.096 171546.337 1.87727977 -17.728358 18.0643999          0.0
 620     .031  -326305.07 71337.8796 254965.977 -326324.43 71345.6372 254978.778 7.87611384 -20.076877 14.5741097          0.0
 640     .032  -277566.33 -35863.572 313435.205 -277584.11 -35861.667 313452.128  13.103992 -20.460237 9.65710413          0.0
 660     .033  -201657.44 -139554.45 341223.216  -201671.9 -139558.58 341242.605 17.0493204 -18.840747 3.79479143          0.0
 680     .034  -106008.88 -229584.77 335609.907 -106018.61 -229594.53 335629.864  19.325729 -15.377102 -2.4390702          0.0
 700     .035  16.5804656 -297141.76 297144.723 12.5453044  -297156.2 297163.286  19.71046 -10.408189 -8.4341036          0.0
 720     .036  106040.467 -335612.42 229592.953 106042.526 -335630.13 229608.309 18.1657129 -4.4205153 -13.603501          0.0
 740     .037  201684.346 -341231.05 139567.011 201692.285 -341250.29  139577.65 14.8427317 1.99987014 -17.441193          0.0
 760     .038  277585.965 -313447.58 35879.3324  277599.02 -313466.46 35884.2272 10.0668254 8.22449444 -19.571549          0.0
 780     .039  326315.489 -254981.71  -71320.45 326332.372  -254998.4 -71321.782 4.30549772 13.6439794 -19.786137          0.0
***                                                   Close switch  "NO4A  "  to  "  "  after  4.00000000E-02  sec.
 800      .04  343102.989 -171556.44 -171538.85 343122.045 -171569.29 -171546.27 -1.8771565 17.7279445 -18.063927          0.0
 820     .041  163834.986 -69879.626 -236088.51       0.0 -115313.98 -264781.85 8752.99847 35.5105882 -1.1389211 8046.06109
 840     .042  -52042.272  -11558.57 -336783.87       0.0 46556.2489  -256171. 16704.8784 -17.221033  -62.44426 15599.3313
 860     .043  105944.291 113259.095  -346453.9       0.0 74536.4324 -373235.54 22696.6107 -2.0831918 -58.065839  21056.862
 880     .044  172018.978 240609.072 -309080.76       0.0 157559.219 -386547.95 25830.3021 54.1498638 -8.915947  24909.577
 900     .045  -70589.162 276187.211 -300945.58       0.0 313057.466 -254313.18 26269.4519 17.2640975 -43.68349  25381.251
 920     .046  -39812.895 313311.358 -237782.54       0.0 322914.007 -227091.88 23991.7462  -15.32601 -74.115499 22407.7305
 940     .047  94706.9209 359215.635 -117065.07       0.0 287934.347 -196330.92 18797.2775  35.903393 -21.909769 17636.4477
 960     .048  -95410.363 319875.143 -27608.343       0.0 345284.343 -7275.4755 11481.0306 33.0034596 -16.835935 10700.4991
 980     .049  -165780.94 247145.238 63771.8923       0.0 306227.404 112806.294  3000.4043 -26.708334  -66.76776 1579.08265
1000      .05  2196.57941 194959.376 185998.778       0.0 158595.476 131203.024 -6211.5666 -3.6570317 -38.498266 -7568.4431
```

Listagem 3.4 - Ficheiro (exemplo2.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI com acoplamentos (p4)

```
  1020      .051   -79958.835  98501.2321  268798.618   0.0  105398.785  259770.251  -15194.343  29.2843885  2.04980867  -15985.192
  1040      .052    -202320.3  -26592.828  310850.614   0.0  49165.2857  369985.462  -22707.012  -25.817242  -42.462657  -23917.798
  1060      .053   -42218.796  -112760.05  351038.788   0.0  -124490.05  317296.645  -28278.541  -40.208151  -50.681285  -29737.595
  1080      .054   -6838.4574  -192502.36  352475.355   0.0  -223280.73  302150.336  -31507.325  13.0278981  7.27434544  -32398.647
  1100      .055   -136566.91  -275956.25  303289.518   0.0  -230690.06  331345.459   -31712.02  -10.636921   -8.448563   -32724.31
  1120      .056    -28101.16  -308802.65  242014.333   0.0  -321656.66  209867.021  -28951.633  -55.921042  -47.156238  -30401.448
  1140      .057   88444.2889  -304968.67  160899.262   0.0  -383902.37  64654.0399  -23766.618  -8.2859534  4.11519003  -24800.082
  1160      .058   -21897.782  -289797.98  52656.0722   0.0   -305245.6  22815.3038  -16394.182  9.82424503  27.6946265  -17266.385
  1180      .059   2470.06552  -232442.49  -50124.391   0.0   -261178.1  -93261.403  -7457.0239  -47.360102  -22.166019  -8802.3253
  1200       .06   140626.162  -143257.77  -142916.23   0.0  -254334.47   -267502.1  1871.25299  -29.136333  .997334512   704.7315
  1220      .061   62328.9841  -53836.608  -228442.48   0.0  -123476.38  -310321.75  10796.5366  22.0688492  55.7499124  9982.05084
  1240      .062    -1686.984  50409.1281  -282311.04   0.0  14940.2952   -329434.9  18666.7448  -22.695803  17.0474584   17480.337
  1260      .063   106753.15  157913.711  -304514.98   0.0  54662.9719  -419471.12  24473.5109  -43.868254  1.07331057  23221.3169
  1280      .064   69452.5921   237239.2  -303123.08   0.0  150215.151  -402977.96  27610.6484  18.6281207  63.5245234  26772.7539
  1300      .065   -52458.919  302141.039  -261124.84   0.0  282773.175  -292813.71  28034.9402  6.85522477  51.6716609   27011.808
  1320      .066   3952.51032  346463.331  -188305.22   0.0  291543.913  -255348.53  25585.1088   -44.9877  .748769091  24312.8205
  1340      .067   16577.4178  341462.712  -106896.12   0.0  276982.669  -186079.58  20345.1388  3.88068567  43.2924174  19425.6746
  1360      .068   -110198.77  310287.367  -4167.3928   0.0  320471.808  -8015.0197  13055.1666  33.3882187  62.5153623  12156.8776
  1380      .069    -99593.7  262643.143  109538.239   0.0  270157.843  105017.929  4442.08188   -26.22813  -4.1639928  3212.70904
  1400       .07   -35482.92  170896.693  198315.373   0.0  145472.632  158513.688  -4859.8664  -9.6956299  .117123023  -5883.4161
  1420      .071   -117763.3  63781.1043  273139.367   0.0  92610.7207  288793.472  -13805.332  52.4101244  43.5072136  -14641.721
  1440      .072   -134916.55  -28172.176  339364.058   0.0  20355.9905  379284.169  -21397.333  10.7782786  -11.233841   -22539.87
  1460      .073   -35521.175  -134511.47  357598.632   0.0  -133717.38  348819.604  -27085.755  -11.740188  -45.901966  -28199.796
  1480      .074   -51775.301  -237062.92  335254.733   0.0  -217891.05  346178.153   -30292.08  59.3751871  7.08596825  -31132.664
  1500      .075   -84131.304  -288325.49  303748.579   0.0  -240268.76  351113.626  -30524.375  52.4978667  -10.929328  -31564.854
  1520      .076   15776.2576  -322176.99  233916.904   0.0  -319906.05  234834.888  -27884.375  -2.1735348  -68.349211  -29050.155
  1540      .077   52717.2114  -345393.67     122305.   0.0  -358397.94  108547.607  -22707.443  48.6664129  -23.503743  -23604.208
  1560      .078   7607.19037  -308656.82  21421.1941   0.0  -289043.33  46880.0557  -15324.361  77.9092821  5.37106005  -16277.773
  1580      .079   68853.1952  -236269.58  -77692.403   0.0  -244424.53  -79251.508  -6489.3415  9.48278648  -50.566012  -7660.4145
  1600       .08   126137.484  -171698.12  -198112.76   0.0  -212500.73  -233561.62  2787.03418  18.0060481  -30.057407  1815.69779
* * *
* * *                                                    Open switch "NO2C" to "NO3C" after 8.00500000E-02 sec.
                                                         Open switch "NO2B" to "NO3B" after 8.02500000E-02 sec.
  1620      .081    107343.23  -146493.11   -216353.3   0.0  -155831.82  -209090.39  11753.1551   0.0   0.0  10833.6567
  1640      .082   71601.3007  -162481.43  -230240.71   0.0  -146703.08  -198222.21  19525.7047   0.0   0.0  18465.1183
  1660      .083   85001.4732  -151440.04  -218656.38   0.0   -159011.1  -210364.04  25320.8861   0.0   0.0   24081.713
  1680      .084   72193.5284   -129064.8  -191439.12   0.0  -180006.05  -236973.77  28529.6893   0.0   0.0  27277.7394
  1700      .085   46712.4866  -124811.83  -176811.95   0.0  -189149.32   -253753.4  28842.8547   0.0   0.0  27738.2208
  1720      .086   -15524.922  -143183.33  -188420.24   0.0   -182722.4  -247402.48  26274.1825   0.0   0.0  25290.4524
  1740      .087   -65783.468  -164381.52  -211462.33   0.0  -171169.81  -228605.88  21101.2681   0.0   0.0   20098.03
  1760      .088   -67265.972  -174201.81  -225574.71   0.0  -161634.04  -214618.73  13810.8461   0.0   0.0  12731.4373
  1780      .089   -42884.967  -178035.11  -231114.79   0.0  -153121.54  -207019.12  5087.45896   0.0   0.0  4005.57389
* * *
                                                         Open switch "NO2A" to "NO3A" after 8.96000000E-02 sec.
  1800       .09   -113518.71  -237127.31  -294674.73   0.0  -107585.34  -149425.82     0.0   0.0   0.0  -1184.656
  1820      .091   -76410.599  -200335.46  -257190.68   0.0  -137255.41  -183775.23     0.0   0.0   0.0  -870.70232
  1840      .092   31670.4394  -129755.47  -183954.41   0.0  -187092.55  -247881.58     0.0   0.0   0.0  -811.45492
  1860      .093   94762.1595  -95703.201  -144417.13   0.0  -209036.28  -282089.32     0.0   0.0   0.0  -1031.7562
  1880      .094   55301.3603   -125144.7  -174847.84   0.0  -187168.09  -254991.98     0.0   0.0   0.0  -1273.3023
  1900      .095   -35129.316  -184599.52  -243503.77   0.0  -145068.67  -193974.99     0.0   0.0   0.0  -1288.7315
  1920      .096   -79573.952  -218669.54  -283250.39   0.0  -119528.45  -157982.74     0.0   0.0   0.0  -1089.7557
  1940      .097   -38080.773  -198789.48   -259142.9   0.0  -131445.15  -178585.18     0.0   0.0   0.0  -905.69639
  1960      .098   38031.1446  -145426.49  -199356.59   0.0  -170200.79   -231942.1     0.0   0.0   0.0  -926.05273
  1980      .099   67481.6284  -109619.16  -161304.02   0.0  -200355.99  -267506.89     0.0   0.0   0.0  -1109.9145
% % % % % %    Final time step,  PLTFIL  dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
  2000       0.1   24485.3192  -125073.28  -175837.55   0.0   -193153.7  -256605.39     0.0   0.0   0.0  -1249.5444
```

Listagem 3.4 - Ficheiro (exemplo2.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI com acoplamentos (p5)

```
Extrema of output variables follow.   Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima :   343102.989 430010.552 421694.965 343122.047 404302.549 445811.322 29075.7192  164.25639 150.980931  30217.982
Times of maxima :          .04       .0468      .05415        .02       .0467       .0537      .08455      .04055      .04925      .08445
Variable minima :   -343102.99 -400851.29 -447590.02 -343122.04 -383902.37 -440911.12 -32023.804 -161.39209 -151.74472 -33290.423
Times of minima :          .01      .05575       .0422        .01        .057      .04265       .0546       .0512      .05685       .0547

Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Defini‡Æo das sa¦das para plotter
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Blank card terminating all plot cards.                |BLANK CARD finalizando defini‡Æo das sa¦das para plotter
Actual List Sizes for the preceding solution follow.        28-Sep-96  11.31.54
    Size  1-10:     13      6      7      3     69      4     12      0      0      0
    Size 11-20:      0     10  -9999  -9999  -9999      0      0      0     23      0
    Size 21-29:      0      0     33      0  -9999  -9999  -9999  -9999  -9999
Seconds for overlays  1-5  :      5.330      0.000      5.330   -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays  6-11 :      0.330      0.000      0.330
Seconds for overlays 12-15 :      0.385      0.000      0.385
Seconds for time-step loop :      0.824      0.000      0.824
Seconds after DELTAT-loop  :      0.055      0.000      0.055
                                 ---------------------------
                    Totals  :      6.923      0.000      6.923

Disconnect disk file from I/O unit.                   |$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
```

Listagem 3.4 - Ficheiro (exemplo2.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito numa linha utilizando o esquema em equivalente PI com acoplamentos (p6)

Anexo C

Listagem 4.2

```
   ---    84   cards of disk file read into card cache cells  1   onward.
Alternative Transients Program (ATP), Salford 80386 translation.  All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 28-Sep-96  17.15.13    Name of disk plot file, if any, is  C:EXEMPLO3.pl4
Consult the 800-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTP User Group in Portland,  Oregon, USA.   Program is no older than July, 1993.
Total size of LABCOM tables =  2003949   INTEGER words.   VARDIM  List Sizes follow :   3002  3000 10000   340 20000  1200
 13140 120000  460  900  360  900 36400   255 64800   384    45   254 120000 100000  3000 12000 40000   24 30000  3000   600 126000
-------------------------------------------------------+-------------------------------------------------------------------------------
Descriptive interpretation of input data cards.        |  Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
                                                       0         1         2         3         4         5         6         7         8
1.23456789012345E+79
-------------------------------------------------------+-------------------------------------------------------------------------------
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C data:EXEMPLO3.DAT
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C         1         2         3         4         5         6         7         8
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
Marker card preceding new EMTP data case.              |BEGIN NEW DATA CASE
Disconnect disk file from I/O unit.                    |$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
Connect disk file to I/O unit.                         |$OPEN, UNIT=4 FILE=EXEMPLO3.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN RECL=8000
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Ficheiro - exemplo3.dat
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Defini‡Æo de dados gerais reais
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C DELTAT    TMAX    XOPT    COPT  EPSILN  TOLMAT  TSTART
Misc. data.      5.000E-05   1.000E-01   0.000E+00    |  50.E-6 100.E-3   0.E+0   0.E+0     0.0     0.0     0.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Defini‡Æo de dados gerais inteiros
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C   IOUT   IPLOT  IDOUBL  KSSOUT  MAXOUT    IPUN  MEMSAV    ICAT  NENERG  IPRSUP
Misc. data.      10    1  1  1  1  0  0  1  0  0       |      10       1       1       1       1       0       0       1       0       0
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Defini‡Æo de dados dos ramos
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Impedancia da fonte
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C BUS1  BUS2  BUS3  BUS4       R     L     C
Series R-L-C.    0.000E+00   5.730E-04   0.000E+00    |  NO1A  NO2A                 0.0 0.573   0.0                                   0
Reference branch.    Copy   (NO1A   , NO2A    )        |  NO1B  NO2B  NO1A  NO2A                                                     0
Reference branch.    Copy   (NO1A   , NO2A    )        |  NO1C  NO2C  NO1A  NO2A
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Linha em equivalente PI (SEM ACOPLAMENTOS)
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C BUS1  BUS2  BUS3  BUS4       R     L     C     R     L     C     R     L     C
Begin coupled, lumped elements using [R], [L].         |  USE RL
1st of PI-ckt.     2.999E+00   8.401E-03   0.000E+00  | 1NO2A  NO3A              2.99888.4010     0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 2.999E+00 8.401E-03     | 2NO2B  NO3B                                2.99888.4010     0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00     | 3NO2C  NO3C                                                2.99888.4010     0
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C ----- Transformador
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Sat. Xformer.     0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   |  TRANSFORMER                          TRAN A
Special termination-of-points card.                    |            9999
  Winding 1.    0.0000E+00   2.1600E+01   3.4640E+01  | 1NO3A                            21.6   34.64
  Winding 2.    0.0000E+00   5.4000E+00   1.7320E+01  | 2NO4A                             5.4   17.32
Transformer copy using reference name   "TRAN A"      |  TRANSFORMER TRAN A                   TRAN B
  Winding 1.    (No values read, since copy)           | 1NO3B
  Winding 2.    (No values read, since copy)           | 2NO4B
Transformer copy using reference name   "TRAN A"      |  TRANSFORMER TRAN A                   TRAN C
```

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p1)

```
  Winding 1.    (No values read, since copy)          | 1NO3C
  Winding 2.    (No values read, since copy)          | 2NO4C
Blank card ending branches.   IBR, NTOT = 15   16    |BLANK CARD finalizando dados dos ramos
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Defini‡Æo dos dados dos interruptores
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Interruptor principal
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C BUS1   BUS2        TCLOSE       TOPEN          IE
Switch.   -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00     |   NO4A   NO5A          -1.0         1.1         0.0          1
Switch.   -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00     |   NO4B   NO5B          -1.0         1.1         0.0          1
Switch.   -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00     |   NO4C   NO5C          -1.0         1.1         0.0          1
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Interruptor que cria o curto-circuito
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C BUS1   BUS2        TCLOSE       TOPEN          IE
Switch.    4.00E-02  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00     |   NO5A                40.E-3         1.1         0.0          1
Switch.    4.00E-02  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00     |   NO5B                40.E-3         1.1         0.0          1
Switch.    4.00E-02  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00     |   NO5C                40.E-3         1.1         0.0          1
Blank card ending switches.    KSWTCH = 6.           |BLANK CARD finalizando dados dos interruptores
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Defini‡Æo dos dados das fontes
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C NAME      AMPLITUDE FREQUENCY      PHASE          A1                TSTART      TSTOP
Source.    4.90E+04  5.00E+01  0.00E+00 -1.00E+00     |14NO1A        48990.0        50.0        0.0                            -1.0
Source.    4.90E+04  5.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00     |14NO1B        48990.0        50.0     -120.0                            -1.0
Source.    4.90E+04  5.00E+01 -2.40E+02 -1.00E+00     |14NO1C        48990.0        50.0     -240.0                            -1.0
Blank card ends electric network sources.             |BLANK CARD finalizando dados das fontes

List of input elements that are connected to each node.   Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive
and inductive coupling are ignored).   Repeated entries indicate parallel connections.   Switches are included,   although sources
(including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra,   internally-defined nodes   *UMXXXX*.
--------------+-------------------------------
From bus name |   Names of all adjacent busses.
--------------+-------------------------------
        NO1A    |NO2A   *
        NO2A    |NO1A   *NO3A   *
        NO1B    |NO2B   *
        NO2B    |NO1B   *NO3B   *
        NO1C    |NO2C   *
        NO2C    |NO1C   *NO3C   *
        NO3A    |NO2A   *TRAN A*
        NO3B    |NO2B   *TRAN B*
        NO3C    |NO2C   *TRAN C*
        TRAN A  |TERRA  *NO3A   *
        NO4A    |TERRA  *NO5A   *
        TRAN B  |TERRA  *NO3B   *
        NO4B    |TERRA  *NO5B   *
        TRAN C  |TERRA  *NO3C   *
        NO4C    |TERRA  *NO5C   *
        NO5A    |TERRA  *NO4A   *
        NO5B    |TERRA  *NO4B   *
        NO5C    |TERRA  *NO4C   *
        TERRA   |TRAN A*NO4A   *TRAN B*NO4B   *TRAN C*NO4C   *NO5A   *NO5B   *NO5C   *
--------------+-------------------------------
```

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p2)

Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch. All flows are away from a bus, and the real part, magnitude, or "P
is printed above the imaginary part, the angle, or "Q". The first solution frequency = 5.00000000E+01 Hertz.

Bus K	Bus M	Phasor node voltage Rectangular	Phasor node voltage Polar	Phasor branch current Rectangular	Phasor branch current Polar	Power flow P and Q	Power loss P and Q
NO1A		48990.	48990.	.1098423092E-11	.1098423092E-11	.26905873649E-7	.1308625578E-23
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000000
	NO2A	48990.	48990.	-.1098423309E-11	.1098423092E-11	-.2690587365E-7	
		-.197730721E-12	0.0000000	0.0	180.0000000	.1085959948E-24	
NO1B		-24495.	48990.	0.0	0.0	0.0	0.0
		-42426.5845314	-120.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0
	NO2B	-24495.	48990.	0.0	0.0	0.0	
		-42426.5845314	-120.0000000	0.0	0.0	0.0	
NO1C		-24495.	48990.	0.0	0.0	0.0	0.0
		42426.5845314	120.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0
	NO2C	-24495.	48990.	0.0	0.0	0.0	
		42426.5845314	120.0000000	0.0	0.0	0.0	
NO2A		48990.	48990.	.79013768 13E-12	.2019993129E-11	.19354422503E-7	.4680355927E-23
		-.197730721E-12	0.0000000	-.185904671E-11	-86.9733900	.45537349253E-7	0.0000000
	NO3A	48990.	48990.	-.790137681E-12	.2019993129E-11	-.193544225E-7	
		.3291806118E-11	0.0000000	.1859046714E-11	113.0286100	-.4553734925E-7	
NO2B		-24495.	48990.	-.136724671E-11	.1821355715E-11	-.8780972301E-8	.4835452292E-23
		-42426.5845314	-120.0000000	.1203317527E-11	138.6489066	.43741435501E-7	0.0000000
	NO3B	-24495.	48990.	.1367246711E-11	.1821355715E-11	.87809723007E-8	
		-42426.5845314	-120.0000000	-.120331753E-11	-41.3510934	-.4374143 55E-7	
NO2C		-24495.	48990.	.1203317527E-11	.1821355715E-11	.14266172668E-7	.5107678724E-23
		42426.5845314	120.0000000	.1367246711E-11	48.6489066	.42271680492E-7	0.0
	NO3C	-24495.	48990.	-.120331753E-11	.1821355715E-11	-.1426617267E-7	
		42426.5845314	120.0000000	-.136724671E-11	-131.3510934	-.42271680 49E-7	
NO3A		48990.	48990.	0.0	0.0	0.0	0.0
		.3291806118E-11	0.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0
	TRAN A	48990.	48990.	0.0	0.0	0.0	
		.3291806118E-11	0.0000000	0.0	0.0	0.0	
NO4A		24495.	24495.	.9170508023E-28	.2726707748E-12	.8987631389E-24	.8987631389E-24
		.1645903059E-11	0.0000000	-.272670775E-12	-90.0000000	.3339535315E-8	0.0000000
	TERRA	0.0	0.0	-.917050802E-28	.2726707748E-12	0.0	
		0.0	0.0	.2726707748E-12	90.0000000	0.0	
TRAN A		48990.	48990.	-.458525401E-28	.1363353874E-12	-.898763139E-24	-.898763139E-24

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p3)

```
                .3291806118E-11      0.0000000   .1363353874E-12     90.0000000   -.3339535315E-8      0.0000000

        TERRA              0.0            0.0   .4585254012E-28   .1363353874E-12            0.0
                           0.0            0.0   -.136335387E-12     -90.0000000            0.0

NO3B                    -24495.          48990.            0.0            0.0            0.0            0.0
                   -42426.5845314   -120.0000000            0.0            0.0            0.0            0.0

        TRAN B          -24495.          48990.            0.0            0.0            0.0
                   -42426.5845314   -120.0000000            0.0            0.0            0.0

NO4B                    -12247.5          24495.   .1412203687E-12   .1869926726E-12   .43524376666E-9   .43524376666E-9
                   -21213.2922657   -120.0000000   -.122568622E-12     -40.9555144   -.2248454076E-8      0.0000000

        TERRA              0.0            0.0   -.141220369E-12   .1869926726E-12            0.0
                           0.0            0.0   .1225686219E-12     139.0444856            0.0

TRAN B                  -24495.          48990.   -.706101844E-13   .9349633632E-13   -.4352437667E-9   -.4352437667E-9
                   -42426.5845314   -120.0000000   .6128431096E-13     139.0444856   .22484540764E-8      0.0000000

        TERRA              0.0            0.0   .7061018437E-13   .9349633632E-13            0.0
                           0.0            0.0    -.61284311E-13     -40.9555144            0.0

NO3C                    -24495.          48990.            0.0            0.0            0.0            0.0
                    42426.5845314    120.0000000            0.0            0.0            0.0            0.0

        TRAN C          -24495.          48990.            0.0            0.0            0.0
                    42426.5845314    120.0000000            0.0            0.0            0.0

NO4C                    -12247.5          24495.   .8348877145E-12   .8377570803E-12   -.4377837294E-8   -.4377837294E-8
                    21213.2922657    120.0000000   .6927791674E-13       4.7434636   .92795991912E-8      0.0000000

        TERRA              0.0            0.0   -.834887715E-12   .8377570803E-12            0.0
                           0.0            0.0   -.692779167E-13     -175.2565364            0.0

TRAN C                  -24495.          48990.   -.417443857E-12   .4188785402E-12   .43778372941E-8   .43778372941E-8
                    42426.5845314    120.0000000   -.346389584E-13     -175.2565364   -.9279599191E-8      0.0000000

        TERRA              0.0            0.0   .4174438573E-12   .4188785402E-12            0.0
                           0.0            0.0   .3463895837E-13       4.7434636            0.0
    Total network loss  P-loss  by summing injections =   3.906267265683E-07

Output for steady-state phasor switch currents.
    Node-K    Node-M          I-real          I-imag          I-magn         Degrees         Power          Reactive
    NO4A      NO5A       -9.17050802E-29   2.72670775E-13   2.72670775E-13    90.0000   -8.98763139E-25   -3.33953531E-09
    NO4B      NO5B       -1.41220369E-13   1.22568622E-13   1.86992673E-13   139.0445   -4.35243767E-10    2.24845408E-09
    NO4C      NO5C       -8.34887715E-13   -6.92779167E-14   8.37757080E-13   -175.2565   4.37783729E-09   -9.27959919E-09
    NO5A                      Open            Open            Open            Open            Open            Open
    NO5B                      Open            Open            Open            Open            Open            Open
    NO5C                      Open            Open            Open            Open            Open            Open

Solution at nodes with known voltage.   Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed
result applying to the composite group.   The entry "MVA" is  SQRT( P**2 + Q**2 )  in units of power,  while  "P.F."  is the
associated power factor.
        Node                  Source node voltage                Injected source current                Injected source power
```

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p4)

```
                name          Rectangular              Polar          Rectangular              Polar              P and Q     MVA and P.F.

                NO1A              48990.            48990.        .1098423092E-11   .1806743401E-10     .26905873649E-7   .39357179615E-6
                                    0.0               0.0         .1602984412E-10       86.0800130     -.3926510317E-6          0.0683633

                NO1B             -24495.            48990.        -.116102683E-10   .1560766599E-10     .36348767762E-6   .38230977853E-6
                          -42426.5845314     -120.0000000         -.104307674E-10     -138.0631966     .11854119153E-6          0.9507151

                NO1C             -24495.            48990.        -.110134124E-10   .1241343986E-10     .25637475123E-6   .30406720935E-6
                           42426.5845314      120.0000000          .572697445E-11       152.5255684     -.1634896166E-6          0.8431516
Comment card.    KOMPAR = 1.                                |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                                |C Defini‡Æo das vari veis de sa¡da (tensÆo dos n¢s)
Comment card.    KOMPAR = 1.                                |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                                |C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4   BUS5   BUS6
  +++  Node  "NO5C  "  has no connected linear branches.  Add (to ground) the conductance  G = 1.00000000E-08  mhos.
  +++  Node  "NO5B  "  has no connected linear branches.  Add (to ground) the conductance  G = 1.00000000E-08  mhos.
  +++  Node  "NO5A  "  has no connected linear branches.  Add (to ground) the conductance  G = 1.00000000E-08  mhos.
Card of names for time-step loop output.                  |  NO3A   NO3B   NO3C
Blank card ending requests for output variables.          |BLANK CARD finalizando defini‡Æo das vari veis de sa¡da

Column headings for the  9   EMTP output variables follow.  These are divided among the 5 possible classes as follows ....
  First  3     output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
  Next   6     output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);
   Step       Time        NO3A        NO3B        NO3C        NO4A        NO4B        NO4C        NO5A        NO5B        NO5C
                                                              NO5A        NO5B        NO5C        TERRA       TERRA       TERRA

 ***      Phasor I(0) = -9.1705080E-29                          Switch  "NO4A  "  to  "NO5A  "  closed in the steady-state.
 ***      Phasor I(0) = -1.4122037E-13                          Switch  "NO4B  "  to  "NO5B  "  closed in the steady-state.
 ***      Phasor I(0) = -8.3468771E-13                          Switch  "NO4C  "  to  "NO5C  "  closed in the steady-state.
      0        0.0       48990.     -24495.     -24495.  -.9171E-28  -.1412E-12  -.8349E-12        0.0         0.0         0.0
     10       .5E-3   48386.8955  -17556.468  -30830.428  .241936E-3  -.87783E-4  -.15415E-3        0.0         0.0         0.0
     20       .1E-2   46592.3024  -10185.616  -36406.687  .232963E-3  -.50929E-4  -.18203E-3        0.0         0.0         0.0
     30      .0015   43650.4534  -2563.9605  -41086.493  .218253E-3   -.1282E-4  -.20543E-3        0.0         0.0         0.0
     40       .002   39633.7864  5120.82736  -44754.614   .19817E-3  .256036E-4  -.22377E-3        0.0         0.0         0.0
     50      .0025   34641.2051  12679.5229  -47320.728  .173207E-3  .633971E-4   -.2366E-3        0.0         0.0         0.0
     60       .003   28795.6435   19926.006   -48721.65  .143979E-3  .996295E-4  -.24361E-3        0.0         0.0         0.0
     70      .0035   22241.0387  26681.8442  -48922.883  .111206E-3  .133409E-3  -.24461E-3        0.0         0.0         0.0
     80       .004   15138.7867  32780.6862  -47919.473   .75695E-4  .163903E-3   -.2396E-3        0.0         0.0         0.0
     90      .0045   7663.76865  38072.3585  -45738.127  .383199E-4  .190361E-3  -.22868E-3        0.0         0.0         0.0
    100       .005   .044263298  42426.5624  -42426.607  .128671E-8  .212132E-3  -.21213E-3        0.0         0.0         0.0
    110      .0055   -7663.6801   45736.083  -38072.403  -.38317E-4   .22868E-3  -.19036E-3        0.0         0.0         0.0
    120       .006   -15138.698  47919.4289  -32780.731  -.75692E-4  .239597E-3   -.1639E-3        0.0         0.0         0.0
    130      .0065    -22240.95  48922.8389  -26681.889   -.1112E-3  .244614E-3  -.13341E-3        0.0         0.0         0.0
    140       .007   -28795.555  48721.6057  -19926.051  -.14398E-3  .243608E-3  -.99631E-4        0.0         0.0         0.0
    150      .0075   -34641.117  47320.6843  -12679.568   -.1732E-3  .236603E-3  -.63398E-4        0.0         0.0         0.0
    160       .008   -39633.698  44754.5701   -5120.872  -.19817E-3  .223772E-3  -.25605E-4        0.0         0.0         0.0
    170      .0085   -43650.365  41086.4494  2563.91589  -.21825E-3  .205432E-3   .12819E-4        0.0         0.0         0.0
    180       .009   -46592.214  36406.6433  10185.5711  -.23296E-3  .182033E-3  .509273E-4        0.0         0.0         0.0
    190      .0095   -48386.808  30830.3844  17556.4232  -.24193E-3  .154151E-3  .877816E-4        0.0         0.0         0.0
    200        .01   -48989.956  24494.9785  24494.9773  -.24495E-3  .122474E-3  .122474E-3        0.0         0.0         0.0
    210      .0105   -48386.808  17556.4244  30830.3832  -.24193E-3  .877816E-4  .154151E-3        0.0         0.0         0.0
    220       .011   -46592.215  10185.5724  36406.6423  -.23296E-3  .509273E-4  .182033E-3        0.0         0.0         0.0
    230      .0115   -43650.366  2563.91719  41086.4484  -.21825E-3  .128191E-4  .205432E-3        0.0         0.0         0.0
    240       .012   -39633.699  -5120.8707  44754.5693  -.19817E-3  -.25605E-4  .223772E-3        0.0         0.0         0.0
    250      .0125   -34641.117  -12679.566  47320.6836   -.1732E-3  -.63398E-4  .236603E-3        0.0         0.0         0.0
    260       .013   -28795.556  -19926.049   48721.605  -.14398E-3  -.99631E-4  .243607E-3        0.0         0.0         0.0
```

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p5)

270	.0135	-22240.951	-26681.887	48922.8383	-.1112E-3	-.13341E-3	.244614E-3	0.0	0.0	0.0
280	.014	-15138.699	-32780.73	47919.4285	-.75692E-4	-.1639E-3	.239597E-3	0.0	0.0	0.0
290	.0145	-7663.6809	-38072.402	45736.0827	-.38317E-4	-.19036E-3	.22868E-3	0.0	0.0	0.0
300	.015	.043481144	-42426.606	42426.5622	.126398E-8	-.21213E-3	.212132E-3	0.0	0.0	0.0
310	.0155	7663.76787	-45736.126	38072.3584	.383199E-4	-.22868E-3	.190361E-3	0.0	0.0	0.0
320	.016	15138.7859	-47919.472	32780.6862	.75695E-4	-.2396E-3	.163903E-3	0.0	0.0	0.0
330	.0165	22241.0379	-48922.882	26681.8442	.111206E-3	-.24461E-3	.133409E-3	0.0	0.0	0.0
340	.017	28795.6428	-48721.649	19926.0061	.143979E-3	-.24361E-3	.996295E-4	0.0	0.0	0.0
350	.0175	34641.2045	-47320.728	12679.5231	.173207E-3	-.2366E-3	.633971E-4	0.0	0.0	0.0
360	.018	39633.7859	-44754.613	5120.82752	.19817E-3	-.22377E-3	.256036E-4	0.0	0.0	0.0
370	.0185	43650.4529	-41086.493	-2563.9603	.218253E-3	-.20543E-3	-.1282E-4	0.0	0.0	0.0
380	.019	46592.3021	-36406.687	-10185.616	.232963E-3	-.18203E-3	-.50929E-4	0.0	0.0	0.0
390	.0195	48386.8952	-30830.428	-17556.468	.241936E-3	-.15415E-3	-.87783E-4	0.0	0.0	0.0
400	.02	48990.0434	-24495.022	-24495.022	.244951E-3	-.12248E-3	-.12248E-3	0.0	0.0	0.0
410	.0205	48386.8953	-17556.468	-30830.428	.241936E-3	-.87783E-4	-.15415E-3	0.0	0.0	0.0
420	.021	46592.3023	-10185.616	-36406.687	.232963E-3	-.50929E-4	-.18203E-3	0.0	0.0	0.0
430	.0215	43650.4532	-2563.9604	-41086.493	.218253E-3	-.1282E-4	-.20543E-3	0.0	0.0	0.0
440	.022	39633.7862	5120.82745	-44754.614	.19817E-3	.256036E-4	-.22377E-3	0.0	0.0	0.0
450	.0225	34641.205	12679.523	-47320.728	.173207E-3	.633971E-4	-.2366E-3	0.0	0.0	0.0
460	.023	28795.6433	19926.0061	-48721.649	.143979E-3	.996295E-4	-.24361E-3	0.0	0.0	0.0
470	.0235	22241.0385	26681.8443	-48922.883	.111206E-3	.133409E-3	-.24461E-3	0.0	0.0	0.0
480	.024	15138.7865	32780.6863	-47919.473	.75695E-4	.163903E-3	-.2396E-3	0.0	0.0	0.0
490	.0245	7663.76847	38072.3586	-45736.127	.383199E-4	.190361E-3	-.22868E-3	0.0	0.0	0.0
500	.025	.044080367	42426.5625	-42426.607	.12814E-8	.212132E-3	-.21213E-3	0.0	0.0	0.0
510	.0255	-7663.6803	45736.0831	-38072.403	-.38317E-4	.22868E-3	-.19036E-3	0.0	0.0	0.0
520	.026	-15138.698	47919.429	-32780.731	-.75692E-4	.239597E-3	-.1639E-3	0.0	0.0	0.0
530	.0265	-22240.95	48922.839	-26681.889	-.1112E-3	.244614E-3	-.13341E-3	0.0	0.0	0.0
540	.027	-28795.555	48721.6058	-19926.05	-.14398E-3	.243608E-3	-.99631E-4	0.0	0.0	0.0
550	.0275	-34641.117	47320.6844	-12679.567	-.1732E-3	.236603E-3	-.63398E-4	0.0	0.0	0.0
560	.028	-39633.698	44754.5702	-5120.8719	-.19817E-3	.223772E-3	-.25605E-4	0.0	0.0	0.0
570	.0285	-43650.365	41086.4494	2563.91598	-.21825E-3	.205432E-3	.12819E-4	0.0	0.0	0.0
580	.029	-46592.215	36406.6434	10185.5712	-.23296E-3	.182033E-3	.509273E-4	0.0	0.0	0.0
590	.0295	-48386.808	30830.3844	17556.4233	-.24193E-3	.154151E-3	.877816E-4	0.0	0.0	0.0
600	.03	-48989.956	24494.9786	24494.9774	-.24495E-3	.122474E-3	.122474E-3	0.0	0.0	0.0
610	.0305	-48386.808	17556.4245	30830.3833	-.24193E-3	.877816E-4	.154151E-3	0.0	0.0	0.0
620	.031	-46592.215	10185.5725	36406.6424	-.23296E-3	.509274E-4	.182033E-3	0.0	0.0	0.0
630	.0315	-43650.366	2563.91728	41086.4485	-.21825E-3	.128191E-4	.205432E-3	0.0	0.0	0.0
640	.032	-39633.699	-5120.8706	44754.5694	-.19817E-3	-.25605E-4	.223772E-3	0.0	0.0	0.0
650	.0325	-34641.118	-12679.566	47320.6837	-.1732E-3	-.63398E-4	.236603E-3	0.0	0.0	0.0
660	.033	-28795.556	-19926.049	48721.6051	-.14398E-3	-.99631E-4	.243607E-3	0.0	0.0	0.0
670	.0335	-22240.951	-26681.887	48922.8384	-.1112E-3	-.13341E-3	.244614E-3	0.0	0.0	0.0
680	.034	-15138.699	-32780.729	47919.4285	-.75692E-4	-.1639E-3	.239597E-3	0.0	0.0	0.0
690	.0345	-7663.6811	-38072.402	45736.0828	-.38317E-4	-.19036E-3	.22868E-3	0.0	0.0	0.0
700	.035	.043298606	-42426.606	42426.5623	.125867E-8	-.21213E-3	.212132E-3	0.0	0.0	0.0
710	.0355	7663.76768	-45736.126	38072.3585	.383199E-4	-.22868E-3	.190361E-3	0.0	0.0	0.0
720	.036	15138.7857	-47919.472	32780.6863	.75695E-4	-.2396E-3	.163903E-3	0.0	0.0	0.0
730	.0365	22241.0377	-48922.882	26681.8443	.111206E-3	-.24461E-3	.133409E-3	0.0	0.0	0.0
740	.037	28795.6426	-48721.649	19926.0062	.143979E-3	-.24361E-3	.996295E-4	0.0	0.0	0.0
750	.0375	34641.2043	-47320.727	12679.5232	.173207E-3	-.2366E-3	.633971E-4	0.0	0.0	0.0
760	.038	39633.7857	-44754.613	5120.82762	.19817E-3	-.22377E-3	.256036E-4	0.0	0.0	0.0
770	.0385	43650.4527	-41086.493	-2563.9602	.218253E-3	-.20543E-3	-.1282E-4	0.0	0.0	0.0
780	.039	46592.3019	-36406.686	-10185.615	.232963E-3	-.18203E-3	-.50929E-4	0.0	0.0	0.0
790	.0395	48386.895	-30830.427	-17556.467	.241936E-3	-.15415E-3	-.87783E-4	0.0	0.0	0.0
...						Close switch	"NO5A " to "	" after	4.000000000E-02	sec.
...						Close switch	"NO5B " to "	" after	4.000000000E-02	sec.

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p6)

*** Close switch "NO5C " to " " after 4.00000000E-02 sec.

800	.04	48990.0432	-24495.022	-24495.022	.244951E-3	-.12248E-3	-.12248E-3	0.0	0.0	0.0		
810	.0405	38976.5946	-14071.256	-24905.339	876.07805	-374.91458	-501.16347	876.07805	-374.91458	-501.16347		
820	.041	36405.3629	-7655.764	-28749.599	1750.27067	-626.57502	-1123.6957	1750.27067	-626.57502	-1123.6957		
830	.0415	32970.679	-1217.6689	-31753.01	2554.81034	-729.17264	-1825.6377	2554.81034	-729.17264	-1825.6377		
840	.042	28756.1822	5089.202	-33845.384	3270.63894	-683.96696	-2586.672	3270.63894	-683.96696	-2586.672		
850	.0425	23864.7399	11114.1195	-34978.859	3880.86136	-495.74962	-3385.1117	3880.86136	-495.74962	-3385.1117		
860	.043	18415.9138	16713.1677	-35129.082	4371.1622	-172.72949	-4198.4327	4371.1622	-172.72949	-4198.4327		
870	.0435	12543.0154	21752.7912	-34295.807	4730.15877	273.666535	-5003.8253	4730.15877	273.666535	-5003.8253		
880	.044	6389.82213	26113.0875	-32502.91	4949.68201	829.072016	-5778.754	4949.68201	829.072016	-5778.754		
890	.0445	107.037246	29690.7626	-29797.8	5024.97812	1476.53195	-6501.5101	5024.97812	1476.53195	-6501.5101		
900	.045	-6151.4224	32401.6778	-26250.255	4954.82622	2196.91755	-7151.7438	4954.82622	2196.91755	-7151.7438		
910	.0455	-12232.216	34182.9252	-21950.709	4741.56889	2969.3946	-7710.9635	4741.56889	2969.3946	-7710.9635		
920	.046	-17986.358	34994.379	-17008.021	4391.05502	3771.93393	-8162.9889	4391.05502	3771.93393	-8162.9889		
930	.0465	-23272.881	34819.6876	-11546.806	3912.49627	4581.85138	-8494.3477	3912.49627	4581.85138	-8494.3477		
940	.047	-27962.316	33666.6786	-5704.3623	3318.24075	5376.36391	-8694.6047	3318.24075	5376.36391	-8694.6047		
950	.0475	-31939.874	31567.169	372.704915	2623.46939	6133.14824	-8756.6176	2623.46939	6133.14824	-8756.6176		
960	.048	-35108.275	28576.1848	6532.09021	1845.82266	6830.88829	-8676.711	1845.82266	6830.88829	-8676.711		
970	.0485	-37390.146	24770.609	12619.5371	1004.96656	7449.79782	-8454.7644	1004.96656	7449.79782	-8454.7644		
980	.049	-38729.924	20247.2905	18482.6338	122.108866	7972.10544	-8094.2143	122.108866	7972.10544	-8094.2143		
990	.0495	-39095.227	15120.6626	23974.5642	-780.52268	8382.49017	-7601.9675	-780.52268	8382.49017	-7601.9675		
1000	.05	-38477.648	9519.92748	28957.7208	-1680.2273	8668.45663	-6988.2293	-1680.2273	8668.45663	-6988.2293		
1010	.0505	-36892.969	3585.87747	33307.0913	-2554.3897	8820.64075	-6266.251	-2554.3897	8820.64075	-6266.251		
1020	.051	-34380.765	-2532.5696	36913.3347	-3381.0367	8833.03841	-5452.0017	-3381.0367	8833.03841	-5452.0017		
1030	.0515	-31003.437	-8682.0348	39685.4717	-4139.3777	8703.15145	-4563.7738	-4139.3777	8703.15145	-4563.7738		
1040	.052	-26844.671	-14708.453	41553.1235	-4810.3163	8432.04733	-3621.731	-4810.3163	8432.04733	-3621.731		
1050	.0525	-22007.381	-20460.862	42468.2427	-5376.9205	8024.33114	-2647.4106	-5376.9205	8024.33114	-2647.4106		
1060	.053	-16611.173	-25795.122	42406.2947	-5824.8388	7488.03044	-1663.1916	-5824.8388	7488.03044	-1663.1916		
1070	.0535	-10789.401	-30577.459	41366.8603	-6142.6536	6834.39597	-691.7424	-6142.6536	6834.39597	-691.7424		
1080	.054	-4685.8872	-34687.757	39373.6443	-6322.1616	6077.62299	244.53861	-6322.1616	6077.62299	244.53861		
1090	.0545	1548.62618	-38022.517	36473.8904	-6358.5761	5234.50018	1124.07593	-6358.5761	5234.50018	1124.07593		
1100	.055	7760.18174	-40497.398	32737.2161	-6250.6441	4323.99474	1926.64938	-6250.6441	4323.99474	1926.64938		
1110	.0555	13795.4005	-42049.298	28253.8973	-6000.677	3366.78384	2633.89314	-6000.677	3366.78384	2633.89314		
1120	.056	19505.2577	-42637.902	23132.644	-5614.4933	2384.74405	3229.74922	-5614.4933	2384.74405	3229.74922		
1130	.0565	24748.7517	-42246.674	17497.9218	-5101.2752	1400.4113	3700.86389	-5101.2752	1400.4113	3700.86389		
1140	.057	29396.3761	-40883.262	11486.886	-4473.3422	436.424571	4036.91765	-4473.3422	436.424571	4036.91765		
1150	.0575	33333.3076	-38579.311	5246.00306	-3745.8475	-485.03286	4230.88033	-3745.8475	-485.03286	4230.88033		
1160	.058	36462.2335	-35389.676	-1072.5571	-2936.4044	-1342.7809	4279.1853	-2936.4044	-1342.7809	4279.1853		
1170	.0585	38705.7476	-31391.078	-7314.6696	-2064.6527	-2117.1655	4181.8182	-2064.6527	-2117.1655	4181.8182		
1180	.059	40008.2555	-26680.205	-13328.05	-1151.7747	-2790.5437	3942.31835	-1151.7747	-2790.5437	3942.31835		
1190	.0595	40337.3436	-21371.336	-18966.007	-219.97327	-3347.7192	3567.69246	-219.97327	-3347.7192	3567.69246		
1200	.06	39684.5767	-15593.523	-24091.053	708.074839	-3776.3179	3068.2431	708.074839	-3776.3179	3068.2431		
1210	.0605	38065.7056	-9487.4116	-28578.294	1609.7778	-4067.0937	2457.31585	1609.7778	-4067.0937	2457.31585		
1220	.061	35520.2788	-3201.7773	-32318.502	2463.18511	-4214.1567	1750.97157	2463.18511	-4214.1567	1750.97157		
1230	.0615	32110.6689	3110.13883	-35220.808	3247.52831	-4215.1201	967.591786	3247.52831	-4215.1201	967.591786		
1240	.062	27920.5357	9294.4053	-37214.941	3943.73259	-4071.1594	127.426856	3943.73259	-4071.1594	127.426856		
1250	.0625	23052.7668	15200.1917	-38252.958	4534.88664	-3786.9848	-747.90184	4534.88664	-3786.9848	-747.90184		
1260	.063	17626.9435	20683.4837	-38310.427	5006.6593	-3370.7258	-1635.9335	5006.6593	-3370.7258	-1635.9335		
1270	.0635	11776.3961	25610.6303	-37387.026	5347.65259	-2833.7323	-2513.9203	5347.65259	-2833.7323	-2513.9203		
1280	.064	5644.92076	29861.6362	-35506.557	5549.68257	-2190.2959	-3359.3867	5549.68257	-2190.2959	-3359.3867		
1290	.0645	-616.76148	33333.1169	-32716.355	5607.98099	-1457.2989	-4150.682	5607.98099	-1457.2989	-4150.682		
1300	.065	-6854.7163	35940.8463	-29086.13	5521.31294	-653.79954	-4867.5134	5521.31294	-653.79954	-4867.5134		
1310	.0655	-12915.586	37621.8309	-24706.245	5292.00735	199.436757	-5491.4441	5292.00735	199.436757	-5491.4441		
1320	.066	-18650.368	38335.8625	-19685.494	4925.89986	1080.44748	-6006.3473	4925.89986	1080.44748	-6006.3473		
1330	.0665	-23918.081	38066.5087	-14148.428	4432.18926	1966.61326	-6398.8025	4432.18926	1966.61326	-6398.8025		

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p7)

1340	.067	-28589.238	36821.519	-8232.2814	3823.21112	2835.21404	-6658.4252	3823.21112	2835.21404	-6658.4252	
1350	.0675	-32549.035	34632.6345	-2083.5997	3114.13423	3663.98775	-6778.122	3114.13423	3663.98775	-6778.122	
1360	.068	-35700.179	31554.8074	4145.37137	2322.58723	4431.67776	-6754.265	2322.58723	4431.67776	-6754.265	
1370	.0685	-37965.281	27664.8488	10300.4327	1468.22465	5118.55559	-6586.7802	1468.22465	5118.55559	-6586.7802	
1380	.069	-39288.766	23059.5381	16229.2283	572.243114	5706.90602	-6279.1491	572.243114	5706.90602	-6279.1491	
1390	.0695	-39638.237	17853.2408	21784.9965	-343.14049	6181.46261	-5838.3221	-343.14049	6181.46261	-5838.3221	
1400	.07	-39005.276	12175.0933	26830.1824	-1255.2359	6529.78297	-5274.5471	-1255.2359	6529.78297	-5274.5471	
1410	.0705	-37405.649	6165.82385	31239.8249	-2141.4381	6742.55454	-4601.1164	-2141.4381	6742.55454	-4601.1164	
1420	.071	-34878.921	-25.7117	34904.6327	-2979.7838	6813.82324	-3834.0395	-2979.7838	6813.82324	-3834.0395	
1430	.0715	-31487.48	-6246.1948	37733.6752	-3749.492	6741.13953	-2991.6475	-3749.492	6741.13953	-2991.6475	
1440	.072	-27315.002	-12341.619	39656.6203	-4431.4759	6525.61813	-2094.1422	-4431.4759	6525.61813	-2094.1422	
1450	.0725	-22464.387	-18161.079	40625.4664	-5008.8125	6171.91003	-1163.0976	-5008.8125	6171.91003	-1163.0976	
1460	.073	-17055.232	-23560.491	40615.7232	-5467.1591	5688.0874	-220.92832	-5467.1591	5688.0874	-220.92832	
1470	.0735	-11220.861	-28406.133	39627.0147	-5795.1067	5085.44432	709.662343	-5795.1067	5085.44432	709.662343	
1480	.074	-5105.1435	-32577.944	37683.0876	-5984.4605	4378.21818	1606.24233	-5984.4605	4378.21818	1606.24233	
1490	.0745	1141.2472	-35972.473	34831.2262	-6030.4419	3583.23858	2447.20334	-6030.4419	3583.23858	2447.20334	
1500	.075	7364.34358	-38505.431	31141.0877	-5931.8058	2719.51247	3212.29331	-5931.8058	2719.51247	3212.29331	
1510	.0755	13410.7762	-40113.763	26702.9864	-5690.8712	1807.75566	3883.11549	-5690.8712	1807.75566	3883.11549	
1520	.076	19131.5296	-40757.199	21625.6695	-5313.4641	869.882289	4443.58178	-5313.4641	869.882289	4443.58178	
1530	.0765	24385.6112	-40419.25	16033.639	-4808.774	-71.535261	4880.30925	-4808.774	-71.535261	4880.30925	
1540	.077	29043.5231	-39107.609	10064.0856	-4189.1274	-993.82256	5182.94997	-4189.1274	-993.82256	5182.94997	
1550	.0775	32990.4507	-36853.96	3863.50979	-3469.6843	-1874.7619	5344.44619	-3469.6843	-1874.7619	5344.44619	
1560	.078	36129.0896	-33713.204	-2415.8851	-2668.0648	-2693.1397	5361.20445	-2668.0648	-2693.1397	5361.20445	
1570	.0785	38382.0415	-29762.1	-8619.9418	-1803.915	-3429.2693	5233.18434	-1803.915	-3429.2693	5233.18434	
1580	.079	39693.7198	-25097.375	-14596.345	-898.42355	-4065.4763	4963.89986	-898.42355	-4065.4763	4963.89986	
1590	.0795	40031.7185	-19833.347	-20198.372	26.2005667	-4586.5337	4560.33313	26.2005667	-4586.5337	4560.33313	
1600	.08	39387.6098	-14099.104	-25288.506	947.274711	-4980.0375	4032.76281	947.274711	-4980.0375	4032.76281	
1610	.0805	37777.1516	-8035.3284	-29741.823	1842.20127	-5236.7125	3394.51125	1842.20127	-5236.7125	3394.51125	
1620	.081	35239.8994	-1790.8308	-33449.069	2689.02415	-5350.6409	2661.61674	2689.02415	-5350.6409	2661.61674	
1630	.0815	31838.2324	4481.11393	-36319.346	3466.96946	-5319.4083	1852.43888	3466.96946	-5319.4083	1852.43888	
1640	.082	27655.8172	10626.5414	-38282.359	4156.95709	-5144.1638	987.206716	4156.95709	-5144.1638	987.206716	
1650	.0825	22795.5477	16494.5891	-39290.137	4742.07061	-4829.5915	87.520935	4742.07061	-4829.5915	87.520935	
1660	.083	17377.0112	21941.2116	-39318.223	5207.97386	-4383.7961	-824.17781	5207.97386	-4383.7961	-824.17781	
1670	.0835	11533.5443	26832.7275	-38366.272	5543.26402	-3818.1028	-1725.1612	5543.26402	-3818.1028	-1725.1612	
1680	.084	5408.94881	31049.112	-36458.061	5739.75243	-3146.7798	-2592.9727	5739.75243	-3146.7798	-2592.9727	
1690	.0845	-846.04848	34486.9522	-33640.904	5792.66628	-2386.6861	-3405.9801	5792.66628	-2386.6861	-3405.9801	
1700	.085	-7077.5077	37061.9941	-29984.486	5700.7662	-1556.8577	-4143.9085	5700.7662	-1556.8577	-4143.9085	
1710	.0855	-13132.066	38711.2172	-25579.151	5466.3768	-678.03828	-4788.3385	5466.3768	-678.03828	-4788.3385	
1720	.086	-18860.715	39394.387	-20533.672	5095.32952	227.830828	-5323.1603	5095.32952	227.830828	-5323.1603	
1730	.0865	-24122.469	39095.0459	-14972.577	4596.81906	1138.15077	-5734.9698	4596.81906	1138.15077	-5734.9698	
1740	.087	-28787.835	37820.9183	-9033.0828	3983.17705	2030.22143	-6013.3985	3983.17705	2030.22143	-6013.3985	
1750	.0875	-32742.007	35603.7213	-2861.7148	3269.56842	2881.80014	-6151.3686	3269.56842	2881.80014	-6151.3686	
1760	.088	-35887.684	32498.3839	3389.29987	2473.61806	3671.6491	-6145.2672	2473.61806	3671.6491	-6145.2672	
1770	.0885	-38147.475	28581.6943	9565.78025	1614.97686	4380.05813	-5995.035	1614.97686	4380.05813	-5995.035	
1780	.089	-39465.798	23950.4098	15515.3882	714.837907	4989.32979	-5704.1677	714.837907	4989.32979	-5704.1677	
1790	.0895	-39810.254	18718.8746	21091.379	-204.58533	5484.21491	-5279.6296	-204.58533	5484.21491	-5279.6296	
1800	.09	-39172.419	13016.2041	26156.2147	-1120.6059	5852.28792	-4731.682	-1120.6059	5852.28792	-4731.682	
1810	.0905	-37568.057	6983.10652	30584.9504	-2010.6221	6084.25254	-4073.6304	-2010.6221	6084.25254	-4073.6304	
1820	.091	-35036.728	768.417803	34268.3105	-2852.6737	6174.17058	-3321.4968	-2852.6737	6174.17058	-3321.4968	
1830	.0915	-31640.817	-5474.5626	37115.3796	-3625.9829	6119.60787	-2493.6249	-3625.9829	6119.60787	-2493.6249	
1840	.092	-27463.994	-11591.846	39055.8407	-4311.4658	5921.69413	-1610.2283	-4311.4658	5921.69413	-1610.2283	
1850	.0925	-22609.159	-17432.547	40041.7065	-4892.2022	5585.09486	-692.8927	-4892.2022	5585.09486	-692.8927	
1860	.093	-17195.903	-22852.598	40048.501	-5353.8523	5117.89638	235.955894	-5353.8523	5117.89638	235.955894	
1870	.0935	-11357.567	-27718.295	39075.8615	-5685.0098	4531.4065	1153.60328	-5685.0098	4531.4065	1153.60328	
1880	.094	-5237.9566	-31909.592	37147.5483	-5877.4826	3839.87595	2037.60666	-5877.4826	3839.87595	2037.60666	

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p8)

```
  1890      .0945  1012.19654 -35323.055 34310.8584 -5926.4946 3060.14728 2866.34736 -5926.4946 3060.14728 2866.34736
  1900       .095  7238.94886  -37874.41 30635.4616 -5830.8033 2211.24006 3619.56321 -5830.8033 2211.24006 3619.56321
  1910      .0955  13288.9339 -39500.618 26211.6844   -5592.73 1313.88234 4278.84766   -5592.73 1313.88234 4278.84766
  1920       .096   19013.139 -40161.425 21148.2859 -5218.1032  390.00012 4828.10308 -5218.1032  390.00012 4828.10308
  1930      .0965  24270.5745 -39840.354 15569.7794 -4716.1146 -537.82263 5253.93726 -4716.1146 -537.82263 5253.93726
  1940       .097  28931.7453 -38545.112 9613.36684  -4099.093 -1446.9003 5545.99331  -4099.093 -1446.9003 5545.99331
  1950      .0975  32881.8395 -36307.399 3425.55969 -3382.2006 -2315.0041 5697.20471 -3382.2006 -2315.0041 5697.20471
  1960       .098  36023.5553 -33182.127 -2841.4284 -2583.0594 -3120.9101 5703.96952 -2583.0594 -3120.9101 5703.96952
  1970      .0985  38279.4969 -29246.067 -9033.4296 -1721.3178 -3844.9213 5566.23907 -1721.3178 -3844.9213 5566.23907
  1980       .099  39594.0803 -24595.961 -14998.119 -818.16626 -4469.3531 5287.51933 -818.16626 -4469.3531 5287.51933
  1990      .0995  39934.9017 -19346.138 -20588.764 104.184208 -4978.9688 4874.78464 104.184208 -4978.9688 4874.78464
 % % % % % %   Final time step,  PLTFIL  dumps plot data to ".PL4" disk file.
 Done dumping plot points to C-like disk file.
  2000        0.1  39293.5358 -13625.698 -25667.838 1023.04912 -5361.3552 4338.30607 1023.04912 -5361.3552 4338.30607

Extrema of output variables follow.   Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima :  48990.0434 48989.3497 48989.3503 5793.89905 8845.09324 5718.72971 5793.89905 8845.09324 5718.72971
Times of maxima :          .02      .00665      .01335      .08445       .0508      .09775      .08445       .0508      .09775
Variable minima :  -48989.956 -48989.307 -48989.306 -6362.8522 -5361.3552 -8756.7698 -6362.8522 -5361.3552 -8756.7698
Times of minima :          .03      .03665      .02335       .0544         0.1      .04745       .0544         0.1      .04745

Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Defini‡Æo das sa|das para plotter
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Blank card terminating all plot cards.                |BLANK CARD finalizando defini‡Æo das sa|das para plotter
Actual List Sizes for the preceding solution follow.        28-Sep-96  17.15.19
   Size  1-10:     19     15     11      3     60      6     23      0      0      0
   Size 11-20:      0      9  -9999  -9999  -9999      0      0      0     23      0
   Size 21-29:      0      0     54      0  -9999  -9999  -9999  -9999  -9999
Seconds for overlays  1-5   :      3.791      0.000      3.791   -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays  6-11  :      0.385      0.000      0.385
Seconds for overlays 12-15  :      0.385      0.000      0.385
Seconds for time-step loop  :      1.209      0.000      1.209
Seconds after DELTAT-loop   :      0.110      0.000      0.110
                                 ---------------------------
                   Totals   :      5.879      0.000      5.879

Disconnect disk file from I/O unit.                   |$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
   Size 11-20:      0      9  -9999  -9999  -9999      0      0      0     23      0
   Size 21-29:     18      0     68      0  -9999  -9999  -9999  -9999  -9999
Seconds for overlays  1-5   :      4.231      0.000      4.231   -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays  6-11  :      0.495      0.000      0.495
Seconds for overlays 12-15  :      0.440      0.000      0.440
Seconds for time-step loop  :      1.209      0.000      1.209
Seconds after DELTAT-loop   :      0.110      0.000      0.110
                                 ---------------------------
                   Totals   :      6.484      0.000      6.484
```

Listagem 4.2 - Ficheiro (exemplo3.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico no secundário de um transformador (p9)

Anexo D

Listagem 5.2

```
   ---    110    cards of disk file read into card cache cells  1    onward.
Alternative Transients Program (ATP), Salford 80386 translation.  All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 29-Sep-96  00.51.57     Name of disk plot file, if any, is  C:EXEMPLO4.pl4
Consult the 800-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTP User Group in Portland,  Oregon, USA.    Program is no older than July, 1993.
Total size of LABCOM tables =  2003949    INTEGER words.    VARDIM  List Sizes follow :    3002   3000 10000    340 20000   1200
 13140 120000   460   900   360   900 36400    255 64800    384     45    254 120000 100000   3000 12000 40000    24 30000   3000    800 126000
-------------------------------------------------------+-------------------------------------------------------------------------------------
Descriptive interpretation of input data cards.        |  Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
                                                       0         1         2         3         4         5         6         7         8
1.23456789012345E+79
-------------------------------------------------------+-------------------------------------------------------------------------------------
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C data:EXEMPLO4.DAT
Marker card preceding new EMTP data case.              |BEGIN NEW DATA CASE
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Ficheiro - EXEMPLO4.DAT
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
New power frequency  STATFR = 5.00000000E+01  Hz.      |POWER FREQUENCY, 50
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Defini‡Æo de dados gerais reais
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C DELTAT     TMAX     XOPT     COPT   EPSILN   TOLMAT   TSTART
Misc. data.      2.770E-04    1.000E-01    5.000E+01   |0.000277    0.100     50.0     50.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Defini‡Æo de dados gerais inteiros
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C    IOUT    IPLOT   IDOUBL   KSSOUT   MAXOUT     IPUN   MEMSAV     ICAT   NENERG   IPRSUP
Misc. data.       1     1   0   0   0   0   0   0   0   |        1        1                                  0
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Defini‡Æo de dados dos ramos
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Impedancia da fonte
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R       L       C
Series R-L-C.    0.000E+00   1.967E-02   0.000E+00     |  NO1A   NO2A                     6.180
Series R-L-C.    0.000E+00   1.967E-02   0.000E+00     |  NO1B   NO2B                     6.180
Series R-L-C.    0.000E+00   1.967E-02   0.000E+00     |  NO1C   NO2C                     6.180
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Linha em equivalente PI (sem acoplamentos)
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C BUS1   BUS2   BUS3   BUS4        R       L       C       R       L       C       R       L       C
Begin coupled, lumped elements using [R], [L].         |  USE RL
1st of PI-ckt.     1.080E+02   9.856E-01   0.000E+00   | 1NO2A   NO3A                 107.96309.64      0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 1.080E+02 9.856E-01     | 2NO2B   NO3B                                   107.96309.64      0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00     | 3NO2C   NO3C                                                   107.96309.64      0
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C Transformador
Comment card.    KOMPAR = 1.                           |C
Sat. Xformer.     0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00    |  TRANSFORMER                          TRAN A
Special termination-of-points card.                    |            9999
  Winding 1.    0.0000E+00   4.3200E+00   3.4680E+01   | 1NO3A                            4.320   34.68
  Winding 2.    0.0000E+00   7.6000E-02   1.3800E+01   | 2NO4A   NO4C                     0.076   13.80
Transformer copy using reference name  "TRAN A"        |  TRANSFORMER TRAN A                   TRAN B
  Winding 1.    (No values read, since copy)           | 1NO3B
  Winding 2.    (No values read, since copy)           | 2NO4B   NO4A
Transformer copy using reference name  "TRAN A"        |  TRANSFORMER TRAN A                   TRAN C
  Winding 1.    (No values read, since copy)           | 1NO3C
```

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p1)

```
  Winding 2.    (No values read, since copy)          | 2NO4C NO4B
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C ----- Connectivity capacitors
Series R-L-C.    0.000E+00  0.000E+00  3.183E-09      |  NO5A                                  1.0
Series R-L-C.    0.000E+00  0.000E+00  3.183E-09      |  NO5B                                  1.0
Series R-L-C.    0.000E+00  0.000E+00  3.183E-09      |  NO5C                                  1.0
Blank card ending branches.  IBR, NTOT = 18  21       |BLANK CARD ENDING BRANCH DATA.
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Defini‡Æo dos dados dos interruptores
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Interruptor principal
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C BUS1  BUS2      TCLOSE     TOPEN       IE
Switch.  -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00      |  NO4A  NO5A       -1.0       1.1       0.0                  1
Switch.  -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00      |  NO4B  NO5B       -1.0       1.1       0.0                  1
Switch.  -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00      |  NO4C  NO5C       -1.0       1.1       0.0                  1
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C Interruptor que cria o curto-circuito
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C BUS1  BUS2      TCLOSE     TOPEN       IE
Switch.   4.00E-02  1.00E+00  0.00E+00  0.00E+00      |  NO5A            40.E-3       1.0       0.0                  1
Blank card ending switches.   KSWTCH = 4.            |BLANK CARD ENDING SWITCH DATA.
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C ----- Infinite bus voltages
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Source.   4.90E+05  5.00E+01  0.00E+00 -1.00E+00      |14NO1A      489897    50.0       0.0                  -1.0
Source.   4.90E+05  5.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00      |14NO1B      489897    50.0    -120.0                  -1.0
Source.   4.90E+05  5.00E+01  1.20E+02 -1.00E+00      |14NO1C      489897    50.0     120.0                  -1.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C ----- Synchronous machine specifications
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C
Source.   1.17E+04  5.00E+01  3.40E+01 -9.99E+03      |59NO5A    11718.36    50.0      34.0
2nd phase of S.M.   1.17184E+04    -86.00             |  NO5B
3rd phase of S.M.   1.17184E+04   -206.00             |  NO5C
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C ----- First generator
  Optimize Park's data.       2.000E+00              |PARAMETER FITTING        2.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C --- Machine ratings
  4th S.M. card.   1  1  0  0  8  0.550  0.550        | 1 1     8      0.55      0.55     90.0      13.8     280.0
  q-axis.   0.000    0.0000    0.0000    0.0000       |BLANK CARD - NO SATURATION MODELING
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C --- Machine parameters - manufacturer's data
  5th S.M. card.     0.0380    0.2200    1.2000       | 0.038     0.220     1.200     0.700     0.350     0.700     0.250     0.230
  6th S.M. card.     6.2400    0.0000    0.0320       | 6.240               0.032     0.060     0.150
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C --- Mechanical system data
  Mass card  1 1  1.000E+00  3.116E+00  0.000E+00     | 1         1.0       3.116092
 Blank card terminating S.M. mass cards.              |BLANK CARD ENDING MASS CARDS
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C --- Output data request
 Blank card terminating S.M. output requests.         |BLANK CARD ENDING OUTPUT REQUEST
  End of  0   TACS interfaces.  Parallel follows.     |  FINISH PART
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C ----- Second generator
  Optimize Park's data.       2.000E+00              |PARAMETER FITTING        2.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C --- Machine ratings
  4th S.M. card.   1  1  0  0  8  0.450  0.450        | 1 1     8      0.45      0.45     76.0      13.8     250.0
  q-axis.   0.000    0.0000    0.0000    0.0000       |BLANK CARD - NO SATURATION MODELING
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C --- Machine parameters - manufacturer's data
  5th S.M. card.     0.0040    0.1750    1.1500       | 0.004     0.175     1.150     0.685     0.310     0.685     0.210     0.182
  6th S.M. card.     5.8500    0.0000    0.0360       | 5.850               0.036     0.073     0.132
Comment card.    KOMPAR = 1.                          |C --- Mechanical system data
```

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p2)

```
  Mass card  1 1  1.000E+00  3.333E+00  0.000E+00 | 1          1.0        3.333065
 Blank card terminating S.M. mass cards.          |BLANK CARD ENDING MASS CARDS
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C --- Output data request
 Blank card terminating S.M. output requests.     |BLANK CARD ENDING OUTPUT REQUEST
  End of  0   S.M.-TACS interface variables.      |  FINISH
Blank card ends electric network sources.         |BLANK CARD ENDING SOURCE DATA.
      +++///  Caution.  Disconnected subnetwork.  During the Y-matrix elimination for phasor voltages, a near-zero diagonal element
                 for node  "O4B   "  exists just prior to reciprocation.   Statistics follow:  Original ABS(Ykk) = 1.31578947E+01,
                 questionable value = 0.00000000E+00,   tolerance ratio  TOLMAT = 1.00000000E-08  .   The node in question might b
                 connected to other nodes, forming a subnetwork, but that subnetwork has no, or only very weak, paths to ground or
                 to any other known voltage node of the steady-state network.   The solution voltages for this isolated subnetwork
                 will now be set to zero, as the solution continues.
     Total network loss  P-loss  by summing injections =   1.818125215795E+08

Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C ----- Node voltage output request
  ++++  Type-59 S.M. number 1  begins operation on segments 0  and 0.
  ++++  Type-59 S.M. number 2  begins operation on segments 0  and 0.
Card of names for time-step loop output.          |  NO4A  NO4B  NO4C
Blank card ending requests for output variables.  |BLANK CARD ENDING SELECTIVE NODE VOLTAGE OUTPUT REQUEST.

Column headings for the  7   EMTP output variables follow.  These are divided among the 5 possible classes as follows ....
  First  3      output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
  Next   4      output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);
   Step       Time        NO4A        NO4B        NO4C        NO4A        NO4B        NO4C        NO5A
                                                           NO5A        NO5B        NO5C        TERRA
 ***       Phasor I(0) =  4.2072950E+03                      Switch  "NO4A  "  to  "NO5A  "  closed in the steady-state.
 ***       Phasor I(0) = -3.1916652E+03                      Switch  "NO4B  "  to  "NO5B  "  closed in the steady-state.
 ***       Phasor I(0) = -1.0156298E+03                      Switch  "NO4C  "  to  "NO5C  "  closed in the steady-state.
      %%%%%   Floating subnetwork found!   %%%%%%  %%%%%%  %%%%%%  %%%%%%
      %%%%%  The elimination of row  "NO4C N"  of nodal admittance matrix [Y] has produced a near-zero diagonal value  Ykk =
             0.00000000E+00   just prior to reciprocation.  The acceptable minimum is  ACHECK = 5.72513924E-09   (equal to EPSILN
             times the starting Ykk).   This node shall now to shorted to ground with  1/Ykk = FLTINF.
      0        0.0  9714.96073 817.431472 -10532.392 4207.29495 -3191.6652 -1015.6298        0.0
      1    .277E-3  11125.5378 946.060952 -12071.599 4513.64262 -3235.3364 -1278.3062        0.0
      2    .554E-3  5981.25823 4416.88871 -10398.147 4792.17902 -3258.0027 -1534.1763        0.0
      3    .831E-3  9571.57518 3222.27587 -12793.851 5034.76121 -3256.3581 -1778.4031        0.0
      4    .001108  4526.13183 5890.39069 -10416.523 5238.99555 -3229.5929 -2009.4027        0.0
      5    .001385  7506.44232 5464.81092 -12971.253 5404.61885 -3179.0564 -2225.5625        0.0
      6    .001662  2775.98038 7301.03706 -10077.017 5529.31875 -3104.1387 -2425.1801        0.0
      7    .001939  5318.66816 7480.72806 -12799.396 5613.06387 -3006.3127 -2606.7511        0.0
      8    .002216  899.307188 8520.98835 -9420.2955 5654.25109 -2885.4097 -2768.8414        0.0
      9    .002493   2959.8462 9240.14906 -12199.995 5653.67351 -2743.2795  -2910.394        0.0
     10     .00277  -1019.0267 9503.02672 -8484.0001  5610.1156 -2580.0403 -3030.0753        0.0
     11    .003047  519.998099 10680.0428 -11200.041  5525.1969 -2397.8722 -3127.3247        0.0
     12    .003324  -2922.7734 10209.4149 -7286.6415 5398.17947 -2197.1964  -3200.983        0.0
     13    .003601  -1912.3217 11753.9152 -9841.5936 5231.41829 -1980.4479 -3250.9704        0.0
     14    .003878  -4747.2356 10615.0355 -5867.7999 5024.69575 -1748.3444 -3276.3514        0.0
     15    .004155  -4253.3873 12431.2048 -8177.8175 4781.02382 -1503.5044 -3277.5194        0.0
     16    .004432  -6432.3597 10708.5693 -4276.2097 4500.72593 -1246.9243 -3253.8016        0.0
     17    .004709  -6426.1632 12699.2218 -6273.0586 4187.37685 -981.33197 -3206.0449        0.0
     18    .004986  -7926.3012  10491.962 -2565.6607 3841.84524 -707.97418 -3133.8711        0.0
     19    .005263  -8364.5387 12561.7426 -4197.2039 3468.16178 -429.61175   -3038.55        0.0
     20     .00554  -9187.4891 9978.73811   -791.249 3067.72427 -147.70329  -2920.021        0.0
     21    .005817  -10015.269 12036.3584 -2021.0891 2644.90161 135.034144 -2779.9358        0.0
     22    .006094  -10185.234 9191.02558 994.208327  2201.5833 416.978764 -2618.5621        0.0
```

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p3)

23	.006371	-11338.158	11151.0971	187.060645	1742.34958	695.533103	-2437.8827	0.0
24	.006648	-10898.773	8156.35848	2742.41405	1269.52305	968.969091	-2238.4921	0.0
25	.006925	-12304.833	9941.07002	2363.76274	787.761755	1234.88187	-2022.6436	0.0
26	.007202	-11315.318	6905.02537	4410.29255	299.743202	1491.50003	-1791.2432	0.0
27	.007479	-12896.783	8445.92288	4450.85964	-189.93325	1736.6791	-1546.7459	0.0
28	.007756	-11427.87	5468.55518	5959.31493	-678.32981	1968.67038	-1290.3406	0.0
29	.008033	-13103.437	6708.53967	6394.89723	-1161.0408	2185.64966	-1024.6089	0.0
30	.00831	-11233.562	3879.58575	7353.97631	-1634.9744	2385.95676	-750.98232	0.0
31	.008587	-12921.003	4775.04686	8145.95648	-2096.047	2568.13724	-472.09024	0.0
32	.008864	-10733.115	2172.93058	8560.18452	-2541.1257	2730.68182	-189.55592	0.0
33	.009141	-12352.469	2695.75039	9656.71898	-2966.5648	2872.54221	94.0226415	0.0
34	.009418	-9931.6151	387.285652	9544.32943	-3369.3041	2992.41593	376.888159	0.0
35	.009695	-11408.78	526.333815	10882.446	-3746.2358	3089.68482	656.550772	0.0
36	.009972	-8840.3956	-1433.1958	10273.5913	-4094.4802	3163.29915	931.181069	0.0
37	.010249	-10110.787	-1671.4638	11782.2508	-4411.5477	3213.07936	1198.46838	0.0
38	.010526	-7479.4463	-3238.2277	10717.674	-4694.8401	3238.26578	1456.57436	0.0
39	.010803	-8491.2776	-3830.3521	12321.6296	-4942.5425	3239.11201	1703.4305	0.0
40	.01108	-5879.5592	-4972.1581	10851.7173	-5152.4259	3215.1744	1937.25154	0.0
41	.011357	-6596.2803	-5879.5261	12475.8063	-5323.3862	3167.12186	2156.2643	0.0
42	.011634	-4083.4353	-6576.34	10659.7753	-5453.6375	3094.84199	2358.79549	0.0
43	.011911	-4484.9855	-7748.1656	12233.1511	-5542.8001	2999.39022	2543.40993	0.0
44	.012188	-2145.205	-7992.8376	10138.0427	-5589.5912	2880.99041	2708.60076	0.0
45	.012465	-2227.9209	-9369.9199	11597.8408	-5594.3494	2741.04674	2853.30271	0.0
46	.012742	-128.18585	-9168.8355	9297.02133	-5556.339	2580.11455	2976.22447	0.0
47	.013019	96.5584768	-10687.609	10591.0504	-5476.5939	2399.90169	3076.69222	0.0
48	.013296	1898.86664	-10060.911	8162.04465	-5354.9542	2201.2809	3153.67331	0.0
49	.013573	2406.99717	-11657.274	9250.27733	-5193.1098	1986.21276	3206.89703	0.0
50	.01385	3866.39901	-10638.346	6771.94663	-4991.4899	1755.8642	3235.62566	0.0
51	.014127	4624.02236	-12250.839	7626.81648	-4752.3865	1512.39267	3239.99381	0.0
52	.014404	5708.7622	-10884.852	5176.08999	-4476.8142	1257.227	3219.5872	0.0
53	.014681	6675.11041	-12456.923	5781.81294	-4167.6001	992.661568	3174.93858	0.0
54	.014958	7368.14098	-10798.479	3430.33831	-3826.3225	720.345786	3105.97667	0.0
55	.015235	8498.16795	-12279.799	3781.63079	-3456.2631	442.647461	3013.61567	0.0
56	.015512	8797.07379	-10389.855	1592.7812	-3059.5233	161.386743	2898.13654	0.0
57	.015789	10043.4463	-11736.846	1693.39978	-2639.7471	-121.06134	2760.80842	0.0
58	.016066	9959.27896	-9679.3221	-279.95685	-2199.4986	-402.76343	2602.26201	0.0
59	.016343	11273.7099	-10855.225	-418.48455	-1742.68	-681.40492	2424.08491	0.0
60	.01662	10828.9218	-8693.7405	-2135.1813	-1272.2397	-955.0028	2227.24253	0.0
61	.016897	12162.9936	-9668.5812	-2494.4124	-792.22426	-1221.3702	2013.59445	0.0
62	.017174	11388.8333	-7463.7595	-3925.0738	-305.87115	-1478.5417	1784.41287	0.0
63	.017451	12694.6032	-8214.5339	-4480.0693	182.749038	-1724.5229	1541.77381	0.0
64	.017728	11628.4256	-6022.1772	-5606.2484	670.217872	-1957.4339	1287.21606	0.0
65	.018005	12859.1507	-6533.4218	-6325.7289	1152.56317	-2175.532	1022.96886	0.0
66	.018282	11542.0789	-4403.6504	-7138.4286	1626.30215	-2377.0888	750.786654	0.0
67	.018559	12653.3369	-4668.3618	-7984.9751	2087.68093	-2560.6643	472.983387	0.0
68	.018836	11128.5835	-2645.5933	-8482.9902	2533.27153	-2724.7414	191.469852	0.0
69	.019113	12079.9103	-2666.2751	-9413.6351	2959.65055	-2868.2241	-91.426416	0.0
70	.01939	10391.8677	-789.73163	-9602.1361	3363.56095	-2989.858	-373.70295	0.0
71	.019667	11148.831	-579.21462	-10569.616	3742.00949	-3088.9203	-653.08923	0.0
72	.019944	9342.81852	1116.45134	-10459.27	4092.01807	-3164.46	-927.55806	0.0
73	.020221	9879.25406	1534.78983	-11414.044	4411.10711	-3216.144	-1194.9631	0.0
74	.020498	8001.62893	3019.13978	-11020.769	4696.67312	-3243.3545	-1453.3186	0.0
75	.020775	8301.64495	3612.04448	-11913.689	4946.81514	-3246.1514	-1700.6638	0.0
76	.021052	6399.8945	4859.03199	-11258.926	5159.38506	-3224.2676	-1935.1174	0.0
77	.021329	6459.22943	5585.03539	-12044.265	5333.10596	-3178.1481	-2154.9578	0.0

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p4)

78	.021606	4581.68273	6573.78409	-11155.467	5466.34947	-3107.8831	-2358.4664	0.0
79	.021883	4408.09448	7385.75879	-11793.853	5558.48903	-3014.2835	-2544.2056	0.0
80	.02216	2603.01702	8101.79559	-10704.813	5608.46361	-2897.7925	-2710.6711	0.0
81	.022437	2215.56193	8950.08201	-11165.644	5616.30531	-2759.5595	-2856.7458	0.0
82	.022714	529.589402	9386.71271	-9916.3021	5581.55154	-2600.3669	-2981.1847	0.0
83	.022991	-43.131307	10222.3803	-10179.249	5504.88477	-2421.667	-3083.2178	0.0
84	.023268	-1567.0582	10381.814	-8814.7559	5386.45577	-2224.5585	-3161.8972	0.0
85	.023545	-2289.4025	11159.5865	-8870.184	5227.57376	-2010.7551	-3216.8187	0.0
86	.023822	-3614.2744	11053.4423	-7439.1679	5029.0017	-1781.6405	-3247.3612	0.0
87	.024099	-4446.3954	11733.9001	-7287.5047	4792.63749	-1539.1418	-3253.4957	0.0
88	.024376	-5543.1333	11382.8528	-5839.7196	4519.8387	-1284.8889	-3234.9498	0.0
89	.024653	-6443.6885	11933.693	-5490.0044	4213.03959	-1020.9691	-3192.0705	0.0
90	.02493	-7292.5179	11366.2113	-4073.6933	3874.15778	-749.21146	-3124.9463	0.0
91	.025207	-8220.8652	11762.5605	-3541.6953	3506.09751	-471.8057	-3034.2918	0.0
92	.025484	-8811.8011	11012.8944	-2201.0933	3111.28421	-190.72588	-2920.5583	0.0
93	.025761	-9729.4486	11236.8756	-1507.427	2693.0117	91.7979425	-2784.8096	0.0
94	.026038	-10061.817	10342.6303	-280.81351	2254.14334	373.707355	-2627.8507	0.0
95	.026315	-10933.105	10382.5292	550.57537	1798.2688	652.796711	-2451.0655	0.0
96	.026592	-11014.237	9382.25193	1631.98541	1328.60263	926.988684	-2255.5913	0.0
97	.026869	-11806.427	9231.67985	2574.74735	848.925019	1194.16798	-2043.093	0.0
98	.027146	-11649.853	8162.87584	3486.97703	362.700233	1452.30627	-1815.0065	0.0
99	.027423	-12332.95	7820.26699	4512.68335	-126.21501	1699.44327	-1573.2283	0.0
100	.0277	-11956.493	6718.14033	5238.35263	-614.2194	1933.66731	-1319.4479	0.0
101	.027977	-12503.172	6186.76636	6316.40605	-1097.4983	2153.23372	-1055.7355	0.0
102	.028254	-11927.372	5083.79003	6843.58179	-1572.4324	2356.41172	-783.97932	0.0
103	.028531	-12313.314	4372.27168	7941.04259	-2035.3674	2541.72604	-506.35865	0.0
104	.028808	-11560.459	3298.47022	8261.98845	-2482.7864	2707.68458	-224.89822	0.0
105	.029085	-11765.255	2421.56563	9343.68897	-2911.3076	2853.12586	58.1817421	0.0
106	.029362	-10859.126	1405.21135	9453.91447	-3317.6322	2976.84518	340.787066	0.0
107	.029639	-10867.688	384.524793	10483.1637	-3698.7533	3078.02806	620.725226	0.0
108	.029916	-9833.9042	-547.14918	10381.0534	-4051.6959	3155.79493	895.901017	0.0
109	.030193	-9638.1406	-1682.9269	11321.0675	-4373.9153	3209.69925	1164.21601	0.0
110	.03047	-8504.7985	-2503.3784	11008.1768	-4662.8532	3239.21241	1423.64083	0.0
111	.030747	-8105.1529	-3719.0048	11824.1576	-4916.497	3244.26437	1672.23268	0.0
112	.031024	-6903.3901	-4402.6578	11306.0479	-5132.7821	3224.69119	1908.0909	0.0
113	.031301	-6309.847	-5657.7818	11967.6288	-5310.2793	3180.79621	2129.48314	0.0
114	.031578	-5073.9465	-6180.9896	11254.9361	-5447.477	3112.7824	2334.69458	0.0
115	.031855	-4306.1647	-7432.4168	11738.5815	-5543.5631	3021.31279	2522.25028	0.0
116	.032132	-3072.9639	-7774.9651	10847.929	-5597.6204	2906.94886	2690.6715	0.0
117	.032409	-2159.3877	-8979.4547	11138.8424	-5609.4698	2770.69051	2838.77934	0.0
118	.032686	-966.93496	-9126.2875	10093.2225	-5578.8138	2613.43982	2965.37394	0.0
119	.032963	57.0516577	-10243.455	10186.4036	-5506.1055	2436.50281	3069.60265	0.0
120	.03324	1171.4383	-10186.22	9014.78139	-5391.6751	2241.09559	3150.57947	0.0
121	.033517	2266.04562	-11181.086	8915.04032	-5236.5926	2028.79269	3207.79989	0.0
122	.033794	3267.99514	-10919.115	7651.11992	-5041.8083	1801.0896	3240.71869	0.0
123	.034071	4391.83647	-11763.915	7372.07834	-4808.9786	1559.78554	3249.19308	0.0
124	.034348	5252.007	-11304.387	6052.38014	-4539.65	1306.61317	3233.03683	0.0
125	.034625	6364.72792	-11979.422	5614.69458	-4236.0205	1043.5467	3192.47385	0.0
126	.034902	7060.36117	-11336.628	4276.26686	-3900.1924	772.506514	3127.68586	0.0
127	.035179	8124.69792	-11830.158	3705.45992	-3534.8459	495.586746	3039.2592	0.0
128	.035456	8640.36876	-11024.008	2383.63929	-3142.5815	214.839278	2927.74219	0.0
129	.035733	9623.4001	-11331.377	1707.97693	-2726.4879	-67.5816	2794.0695	0.0
130	.03601	9950.87075	-10385.473	434.602429	-2289.5889	-349.55449	2639.14344	0.0
131	.036287	10824.4342	-10507.834	-316.59991	-1835.294	-628.92835	2464.22237	0.0
132	.036564	10961.7334	-9447.5057	-1514.2277	-1366.9598	-903.57843	2270.53819	0.0

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p5)

133	.036841	11702.1827	-9390.5456	-2311.6371	-888.21536	-1171.4222	2059.63756	0.0
134	.037118	11652.2103	-8241.2615	-3410.9488	-402.64597	-1430.3997	1833.04564	0.0
135	.037395	12239.8421	-8014.2858	-4225.5562	86.0099943	-1678.5616	1592.55162	0.0
136	.037672	12008.9005	-6800.7305	-5208.17	574.053586	-1913.9801	1339.92654	0.0
137	.037949	12427.4362	-6416.3165	-6011.1197	1057.75361	-2134.9008	1077.1472	0.0
138	.038226	12024.0856	-5162.2273	-6861.8583	1533.41761	-2339.5912	806.173623	0.0
139	.038503	12260.537	-4636.4466	-7624.0904	1997.43911	-2526.5473	529.108191	0.0
140	.03878	11695.0566	-3365.0979	-8329.9587	2446.25256	-2694.2886	248.03601	0.0
141	.039057	11740.1573	-2718.1093	-9022.048	2876.48942	-2841.608	-34.881427	0.0
142	.039334	11024.7039	-1453.1404	-9571.5635	3284.82605	-2967.3241	-317.50191	0.0
143	.039611	10873.8798	-709.80998	-10164.07	3668.23581	-3070.5631	-597.67273	0.0
144	.039888	10023.2197	524.002384	-10547.222	4023.74162	-3150.4782	-873.26346	0.0
...						Close switch "NO5A	" to "	" after 4.01650000E-02 sec.
145	.040165	9677.87397	1333.84047	-11011.714	4348.74926	-3206.5528	-1142.1965	0.0
146	.040442	0.0	3758.86121	-9972.0216	4657.54295	-3246.7107	-1410.8322	1675.32327
147	.040719	0.0	4931.93876	-11123.713	4946.22113	-3270.3928	-1675.8283	4965.7396
148	.040996	0.0	5385.4152	-10815.239	5193.45034	-3267.4014	-1926.0489	8005.07422
149	.041273	0.0	6562.3344	-11026.424	5398.19887	-3237.8841	-2160.3148	10544.9825
150	.04155	0.0	6821.68633	-10567.905	5558.90843	-3182.0284	-2376.8801	12605.9776
151	.041827	0.0	7876.99986	-10866.587	5674.22563	-3100.2929	-2573.9328	14248.1562
152	.042104	0.0	7985.93158	-10300.595	5743.29433	-2993.315	-2749.9794	15489.778
153	.042381	0.0	8922.52091	-10391.181	5765.72888	-2861.9568	-2903.772	16310.2785
154	.042658	0.0	8927.36213	-9816.9659	5741.34581	-2707.2826	-3034.0632	16742.8659
155	.042935	0.0	9753.81089	-9723.0736	5670.46929	-2530.5317	-3139.9376	16769.7657
156	.043212	0.0	9660.48459	-9124.8679	5553.65542	-2333.1242	-3220.5312	16419.0347
157	.043489	0.0	10378.02	-8860.458	5391.93123	-2116.6298	-3275.3015	15675.2687
158	.043766	0.0	10191.7542	-8234.9122	5186.56152	-1882.7776	-3303.7839	14564.7897
159	.044043	0.0	10785.5523	-7795.0008	4939.24848	-1633.4032	-3305.8453	13073.8693
160	.04432	0.0	10499.6673	-7131.4079	4651.92112	-1370.4806	-3281.4405	11228.2503
161	.044597	0.0	10946.3721	-6509.9086	4326.89981	-1096.0456	-3230.8542	9017.92664
162	.044874	0.0	10543.1989	-5795.0368	3966.71031	-812.24626	-3154.464	6470.21457
163	.045151	0.0	10812.7724	-4989.0341	3574.21344	-521.24892	-3052.9645	3581.47646
164	.045428	0.0	10269.6717	-4216.1888	3152.44405	-225.30458	-2927.1395	383.505968
165	.045705	0.0	10331.7041	-3233.5583	2704.70813	73.3586291	-2778.0668	-3118.0402
166	.045982	0.0	9628.95549	-2410.3424	2234.44684	372.454284	-2606.9011	-6884.0938
167	.046259	0.0	9462.10949	-1277.2579	1745.30379	669.756014	-2415.0598	-10897.366
168	.046536	0.0	8593.18114	-431.85291	1241.01463	963.002547	-2204.0172	-15109.846
169	.046813	0.0	8195.58548	803.080427	725.447433	1250.02479	-1975.4722	-19491.997
170	.04709	0.0	7176.92937	1620.51237	202.518098	1528.63897	-1731.1571	-23987.461
171	.047367	0.0	6574.05997	2888.59239	-323.79338	1796.78125	-1472.9879	-28556.568
172	.047644	0.0	5449.98422	3612.34144	-849.50186	2052.39176	-1202.8899	-33138.189
173	.047921	0.0	4695.36063	4835.4771	-1370.6231	2293.55656	-922.93343	-37687.606
174	.048198	0.0	3533.79876	5398.70278	-1883.2085	2518.3859	-635.17739	-42145.1
175	.048475	0.0	2699.60129	6506.46301	-2383.3723	2725.16335	-341.79106	-46467.89
176	.048752	0.0	1578.0508	6859.12313	-2867.3045	2912.22127	-44.916813	-50604.714
177	.049029	0.0	737.683276	7805.52895	-3331.3191	3078.09572	253.22341	-54521.364
178	.049306	0.0	-275.77965	7927.89728	-3771.8478	3221.40052	550.447296	-58180.444
179	.049583	0.0	-1065.9195	8700.01644	-4185.508	3340.9848	844.523192	-61560.234
180	.04986	0.0	-1928.0164	8605.26416	-4569.0784	3435.80521	1133.27322	-64639.077
181	.050137	0.0	-2639.29	9219.80891	-4919.5854	3505.08163	1414.50379	-67407.818
182	.050414	0.0	-3336.7911	8945.28128	-5234.2606	3548.16669	1686.09392	-69858.662
183	.050691	0.0	-3967.999	9436.24878	-5510.6409	3564.69521	1945.9457	-71991.911
184	.050968	0.0	-4512.5769	9029.06945	-5746.5087	3554.45107	2192.05758	-73809.357
185	.051245	0.0	-5081.3165	9433.35327	-5940.001	3517.50733	2422.49364	-75316.224
186	.051522	0.0	-5498.7997	8937.17657	-6089.5324	3454.09175	2635.44067	-76519.055

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p6)

187	.051799	0.0	-6030.1544	9283.715	-6193.9101	3364.71602	2829.19405	-77423.714
188	.052076	0.0	-6349.5524	8730.3353	-6252.2397	3250.04218	3002.19755	-78037.461
189	.052353	0.0	-6866.4213	9034.52883	-6264.0436	3111.00018	3153.04339	-78363.723
190	.05263	0.0	-7111.6181	8440.4658	-6229.152	2948.65752	3280.49448	-78407.83
191	.052907	0.0	-7628.179	8702.85121	-6147.8212	2764.32488	3383.49636	-78169.158
192	.053184	0.0	-7812.8887	8069.37003	-6020.6132	2559.43086	3461.18231	-77649.916
193	.053461	0.0	-8330.6262	8276.88995	-5848.5107	2335.61561	3512.89512	-76845.206
194	.053738	0.0	-8454.6938	7592.0334	-5632.7881	2094.61217	3538.17593	-75754.243
195	.054015	0.0	-8961.3853	7720.85337	-5375.1222	1838.32817	3536.79401	-74368.871
196	.054292	0.0	-9010.8086	6962.89544	-5077.4554	1568.73498	3508.72038	-72686.663
197	.054569	0.0	-9479.1222	6982.59757	-4742.1015	1287.93792	3454.16362	-70698.368
198	.054846	0.0	-9425.8334	6125.08402	-4371.6038	998.074243	3373.52952	-68402.401
199	.055123	0.0	-9815.9427	6004.62447	-3968.8339	701.372785	3267.46107	-65791.635
200	.0554	0.0	-9621.0918	5023.42799	-3536.8469	400.061767	3136.78516	-62868.799
201	.055677	0.0	-9885.2704	4739.16535	-3078.9743	96.4192422	2982.5551	-59632.89
202	.055954	0.0	-9505.8298	3621.49917	-2598.6775	-207.30813	2805.98565	-56094.971
203	.056231	0.0	-9597.0791	3166.69036	-2099.6345	-508.86245	2608.49697	-52264.297
204	.056508	0.0	-8996.3603	1920.69801	-1585.5958	-806.04377	2391.83954	-48163.93
205	.056785	0.0	-8880.501	1314.19704	-1060.4652	-1096.6742	2157.13939	-43816.524
206	.057062	0.0	-8041.1299	-24.074064	-528.16087	-1378.6544	1906.81531	-39259.112
207	.057339	0.0	-7709.6218	-733.84881	7.30838089	-1649.9346	1642.62625	-34528.461
208	.057616	0.0	-6644.8956	-2100.4042	541.975028	-1908.559	1366.58402	-29674.5
209	.057893	0.0	-6123.2064	-2840.2937	1071.83958	-2152.6442	1080.80458	-24745.308
210	.05817	0.0	-4881.0644	-4153.1001	1592.99426	-2380.4137	787.419429	-19798.977
211	.058447	0.0	-4227.1044	-4839.9421	2101.55369	-2590.1859	488.632255	-14888.69
212	.058724	0.0	-2882.5526	-6017.32	2593.76983	-2780.4011	186.631303	-10073.218
213	.059001	0.0	-2173.4081	-6578.2208	3065.96833	-2949.6195	-116.34882	-5402.9463
214	.059278	0.0	-810.77629	-7558.6916	3514.65554	-3096.5421	-418.11346	-929.48079
215	.059555	0.0	-122.49156	-7948.0678	3936.46245	-3220.0194	-716.44302	3306.44019
216	.059832	0.0	1184.89021	-8702.5937	4328.24402	-3318.0647	-1009.1793	7265.88163
217	.060109	0.0	1795.2701	-8908.2923	4687.03165	-3392.8712	-1294.1604	10921.2836
218	.060386	0.0	2998.80428	-9440.0278	5010.12382	-3440.8151	-1569.3087	14248.0482
219	.060663	0.0	3501.47234	-9477.3077	5295.04644	-3462.4786	-1832.5678	17231.4587
220	.06094	0.0	4579.934	-9811.2782	5539.6325	-3457.6405	-2081.992	19859.4547
221	.061217	0.0	4969.79451	-9709.9067	5741.98876	-3426.3025	-2315.6862	22127.0907
222	.061494	0.0	5922.95709	-9879.3578	5900.56196	-3368.6665	-2531.8955	24031.1729
223	.061771	0.0	6210.62813	-9670.6618	6014.11023	-3285.1626	-2728.9476	25572.4909
224	.062048	0.0	7049.17811	-9705.8542	6081.75405	-3176.4143	-2905.3397	26752.8527
225	.062325	0.0	7250.76264	-9413.8223	6102.95131	-3043.2678	-3059.6835	27575.2036
226	.062602	0.0	7986.88343	-9335.5513	6077.53221	-2886.7459	-3190.7863	28043.37
227	.062879	0.0	8115.6932	-8972.7177	6005.67739	-2708.0792	-3297.5982	28160.0668
228	.063156	0.0	8756.26326	-8790.1822	5887.93664	-2508.6504	-3379.2862	27929.4705
229	.063433	0.0	8817.43183	-8357.2953	5725.20991	-2290.0275	-3435.1824	27353.0803
230	.06371	0.0	9360.05512	-8069.1087	5518.75026	-2053.9006	-3464.8497	26435.1169
231	.063987	0.0	9347.86405	-7557.4307	5270.14764	-1802.1159	-3468.0317	25176.2214
232	.064264	0.0	9779.42132	-7154.8545	4981.31689	-1536.6081	-3444.7088	23581.6014
233	.064541	0.0	9677.08015	-6550.4394	4654.4842	-1259.435	-3395.0492	21652.5821
234	.064818	0.0	9974.71547	-6022.4473	4292.16141	-972.70662	-3319.4548	19397.3568
235	.065095	0.0	9756.71037	-5312.1486	3897.13523	-678.6216	-3218.5136	16820.4112
236	.065372	0.0	9891.55669	-4652.1115	3472.42932	-379.39406	-3093.0353	13935.6551
237	.065649	0.0	9528.95221	-3830.9702	3021.29663	-77.292233	-2944.0044	10753.704
238	.065926	0.0	9472.9315	-3044.3116	2547.17128	225.434545	-2772.6058	7297.07186
239	.066203	0.0	8941.69628	-2123.1997	2053.66468	526.515028	-2580.1797	3585.21987
240	.06648	0.0	8676.98488	-1234.3068	1544.50949	823.727448	-2368.2369	-348.60013
241	.066757	0.0	7968.20537	-245.46736	1023.5605	1114.85645	-2138.417	-4474.6714

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p7)

242	.067034	0.0	7497.32539	699.073285	494.733142	1397.76214	-1892.4953	-8748.7456
243	.067311	0.0	6626.27559	1701.8567	-37.990109	1670.3355	-1632.3454	-13131.834
244	.067588	0.0	5978.88995	2636.89386	-570.62466	1930.56536	-1359.9407	-17571.209
245	.067865	0.0	4988.46784	3586.0472	-1099.1716	2176.49394	-1077.3224	-22022.531
246	.068142	0.0	4220.40453	4439.62319	-1619.685	2406.28292	-786.59796	-26429.905
247	.068419	0.0	3175.25766	5266.78796	-2128.2547	2618.17102	-489.91632	-30749.881
248	.068696	0.0	2357.7443	5979.05831	-2621.0763	2810.54017	-189.46387	-34930.201
249	.068973	0.0	1329.46261	6640.09914	-3094.4302	2981.87637	112.553819	-38934.962
250	.06925	0.0	531.727621	7170.39857	-3544.7544	3130.8358	413.918616	-42721.559
251	.069527	0.0	-419.12349	7644.65508	-3968.6218	3256.20832	712.413513	-46266.334
252	.069804	0.0	-1146.2754	7989.56822	-4362.8155	3356.98167	1005.83378	-49539.455
253	.070081	0.0	-1983.1151	8288.17939	-4724.3037	3432.30561	1291.99806	-52530.744
254	.070358	0.0	-2615.5185	8468.41997	-5050.3167	3481.55133	1568.76539	-55222.647
255	.070635	0.0	-3328.7005	8622.84085	-5338.3189	3504.27401	1834.04484	-57616.379
256	.070912	0.0	-3866.8386	8672.97225	-5586.0834	3500.26512	2085.81831	-59703.472
257	.071189	0.0	-4467.6456	8721.60459	-5791.6605	3469.51215	2322.14834	-61492.547
258	.071466	0.0	-4927.9423	8677.10712	-5953.4479	3412.24271	2541.20521	-62979.999
259	.071743	0.0	-5438.5027	8653.91588	-6070.1534	3328.88153	2741.27184	-64177.634
260	.07202	0.0	-5843.057	8542.00929	-6140.8597	3220.0864	2920.77328	-65082.886
261	.072297	0.0	-6286.7242	8469.74267	-6164.9806	3086.70326	3078.27735	-65707.384
262	.072574	0.0	-6654.8787	8304.90729	-6142.3196	2929.79466	3212.52491	-66046.928
263	.072851	0.0	-7049.1674	8192.59287	-6073.0193	2750.59389	3322.4254	-66110.899
264	.073128	0.0	-7391.8538	7975.68916	-5957.6133	2550.52668	3407.0866	-65892.121
265	.073405	0.0	-7744.026	7819.00122	-5796.97	2331.16533	3465.80465	-65396.97
266	.073682	0.0	-8060.4663	7538.6261	-5592.3367	2094.24433	3498.09238	-64815.228
267	.073959	0.0	-8365.1429	7322.03167	-5345.2789	1841.61525	3503.66367	-63550.729
268	.074236	0.0	-8641.3211	6957.38951	-5057.7164	1575.2569	3482.45952	-62191.309
269	.074513	0.0	-8879.7404	6657.73944	-4731.8586	1297.23184	3434.62679	-60539.858
270	.07479	0.0	-9088.5635	6183.03028	-4370.2332	1009.69193	3360.5413	-58584.459
271	.075067	0.0	-9229.7441	5774.83707	-3975.6181	714.837293	3260.78082	-56329.71
272	.075344	0.0	-9333.4637	5165.50728	-3551.0629	414.918285	3136.1446	-53767.096
273	.075621	0.0	-9338.0813	4628.19173	-3099.8188	112.198053	2987.62075	-50906.391
274	.075898	0.0	-9293.8921	3869.07704	-2625.3539	-191.04776	2816.40164	-47746.241
275	.076175	0.0	-9121.6976	3195.75692	-2131.2823	-492.56375	2623.84608	-44305.346
276	.076452	0.0	-8891.0014	2290.04317	-1621.3746	-790.11604	2411.49063	-40593.092
277	.076729	0.0	-8511.6473	1495.99204	-1099.4883	-1081.5194	2181.00766	-36640.125
278	.077006	0.0	-8071.9371	472.271732	-569.57481	-1364.6386	1934.21342	-32468.786
279	.077283	0.0	-7477.0177	-400.43051	-35.613895	-1637.41	1673.02388	-28122.656
280	.07756	0.0	-6832.9502	-1486.948	498.381639	-1897.843	1399.46132	-23636.567
281	.077837	0.0	-6044.7115	-2372.469	1028.42618	-2144.0368	1115.61064	-19064.876
282	.078114	0.0	-5233.1145	-3447.7468	1550.55751	-2374.184	823.626464	-14451.071
283	.078391	0.0	-4304.5826	-4268.8824	2060.89143	-2586.5839	525.69243	-9854.862
284	.078668	0.0	-3389.0899	-5256.2291	2555.61925	-2779.6494	224.030197	-5321.7948
285	.078945	0.0	-2393.2476	-5942.8417	3031.0575	-2951.9203	-79.137201	-909.6352
286	.079222	0.0	-1448.9411	-6781.6198	3483.64783	-3102.0731	-381.57477	3341.33045
287	.079499	0.0	-460.45608	-7287.3684	3910.00301	-3228.9342	-681.06885	7381.97639
288	.079776	0.0	445.142276	-7945.7747	4306.91013	-3331.4933	-975.41688	11182.7506
289	.080053	0.0	1367.4103	-8255.495	4671.37342	-3408.9143	-1262.4592	14707.0134
290	.08033	0.0	2188.33358	-8732.0261	5000.62035	-3460.5491	-1540.0712	17937.9623
291	.080607	0.0	3010.53402	-8857.595	5292.14036	-3485.945	-1806.1954	20851.6616
292	.080884	0.0	3726.30089	-9172.486	5543.69229	-3484.8553	-2058.8369	23442.7186
293	.081161	0.0	4438.58211	-9141.3602	5753.3373	-3457.2418	-2296.0955	25697.3507
294	.081438	0.0	5049.194	-9323.962	5919.44543	-3403.2809	-2516.1645	27618.2584
295	.081715	0.0	5657.94498	-9166.8071	6040.72103	-3323.3597	-2717.3614	29198.1117
296	.081992	0.0	6174.68474	-9244.613	6116.20674	-3218.0779	-2898.1289	30444.0084

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p8)

297	.082269	0.0	6692.96886	-8986.3021	6145.30035	-3088.2376	-3057.0627	31351.6179
298	.082546	0.0	7129.33116	-8978.2167	6127.75507	-2934.8418	-3192.9133	31929.4574
299	.082823	0.0	7568.79008	-8633.2652	6063.68757	-2759.0784	-3304.6092	32173.7669
300	.0831	0.0	7933.66298	-8547.0313	5953.57398	-2562.3156	-3391.2584	32092.7073
301	.083377	0.0	8299.00149	-8118.685	5798.24925	-2346.0826	-3452.1667	31681.9417
302	.083654	0.0	8592.4632	-7951.387	5598.89871	-2112.0615	-3486.8372	30948.7922
303	.083931	0.0	8878.43544	-7433.2859	5357.04926	-1862.0652	-3494.984	29888.4658
304	.084208	0.0	9089.89873	-7174.0319	5074.55661	-1598.028	-3476.5286	28508.1788
305	.084485	0.0	9280.54641	-6553.8131	4753.58883	-1321.981	-3431.6079	26803.9568
306	.084762	0.0	9389.14304	-6188.2149	4396.60968	-1036.0413	-3360.5684	24784.711
307	.085039	0.0	9459.38338	-5452.8552	4006.35527	-742.38744	-3263.9678	22449.5234
308	.085316	0.0	9436.88534	-4969.1833	3585.8142	-443.2479	-3142.5663	19811.6156
309	.085593	0.0	9356.88003	-4111.887	3138.19844	-140.87663	-2997.3218	16875.9743
310	.08587	0.0	9173.60093	-3508.4699	2666.92118	162.457217	-2829.3784	13663.0777
311	.086147	0.0	8916.18465	-2536.2594	2175.56348	464.492375	-2640.0559	10186.6378
312	.086424	0.0	8549.76062	-1828.7382	1667.85122	762.984079	-2430.8353	6476.857
313	.086701	0.0	8100.2108	-768.72165	1147.61927	1055.72477	-2203.344	2557.99192
314	.086978	0.0	7545.71398	5.48982566	618.789089	1340.55073	-1959.3398	-1529.1254
315	.087255	0.0	6911.34556	1104.29927	85.332198	1615.36028	-1700.6925	-5749.9833
316	.087532	0.0	6189.25583	1887.61601	-448.75015	1878.11909	-1429.3689	-10054.776
317	.087809	0.0	5404.6194	2959.84213	-979.46309	2126.8767	-1147.4136	-14401.867
318	.088086	0.0	4562.15068	3684.10514	-1502.6358	2359.77194	-856.93612	-18736.984
319	.088363	0.0	3685.73681	4661.22549	-2014.957	2575.04929	-560.09228	-23017.046
320	.08864	0.0	2788.66556	5263.48168	-2511.9905	2771.06595	-259.07549	-27189.723
321	.088917	0.0	1890.30997	6090.5988	-2990.2103	2946.30903	43.9013096	-31217.127
322	.089194	0.0	1007.10829	6528.91931	-3446.016	3099.40493	346.611068	-35055.095
323	.089471	0.0	150.59605	7177.71614	-3875.9677	3229.13679	646.83093	-38676.223
324	.089748	0.0	-664.43178	7439.66724	-4276.8015	3334.45514	942.346315	-42048.355
325	.090025	0.0	-1435.7231	7911.50628	-4645.4648	3414.4935	1230.97126	-45156.745
326	.090302	0.0	-2152.7153	8011.74422	-4979.131	3468.57804	1510.55293	-47981.627
327	.090579	0.0	-2821.1911	8330.52431	-5275.2338	3496.2388	1778.99504	-50519.72
328	.090856	0.0	-3435.1149	8300.19525	-5531.4796	3497.21617	2034.26338	-52761.116
329	.091133	0.0	-4005.0547	8499.95251	-5745.8779	3471.46599	2274.41191	-54710.59
330	.09141	0.0	-4528.5636	8374.01586	-5916.7504	3419.16183	2497.58857	-56364.168
331	.091687	0.0	-5017.0919	8487.26912	-6042.7561	3340.69346	2702.06259	-57730.674
332	.091964	0.0	-5470.7576	8294.6579	-6122.8943	3236.66508	2886.22927	-58808.221
333	.092241	0.0	-5898.3533	8344.79417	-6156.5243	3107.88756	3048.63674	-59606.281
334	.092518	0.0	-6302.0321	8103.03633	-6143.3619	2955.37328	3187.98863	-60122.167
335	.092795	0.0	-6685.1418	8100.96378	-6083.4919	2780.32314	3303.16877	-60363.755
336	.093072	0.0	-7051.8771	7814.54839	-5977.3595	2584.11865	3393.2409	-60325.931
337	.093349	0.0	-7398.0885	7758.41882	-5825.775	2368.30458	3457.47044	-60013.991
338	.093626	0.0	-7730.3831	7419.60927	-5629.8997	2134.57905	3495.32067	-59420.01
339	.093903	0.0	-8035.6734	7296.47811	-5391.2436	1884.7727	3506.47087	-58546.91
340	.09418	0.0	-8323.5879	6887.74781	-5111.646	1620.83725	3490.80876	-57384.732
341	.094457	0.0	-8571.2318	6676.71085	-4793.2666	1344.82217	3448.44442	-55935.352
342	.094734	0.0	-8792.1406	6174.67401	-4438.5611	1058.86236	3379.69874	-54188.634
343	.095011	0.0	-8953.4162	5851.6196	-4050.266	765.153314	3285.11264	-52147.777
344	.095288	0.0	-9073.8646	5232.73823	-3631.3701	465.938781	3165.43136	-49805.304
345	.095565	0.0	-9111.2577	4776.99728	-3185.0942	163.485603	3021.60861	-47168.954
346	.095842	0.0	-9091.7636	4025.16584	-2714.859	-139.9275	2854.78651	-44237.416
347	.096119	0.0	-8965.4987	3427.79353	-2224.2606	-442.03415	2666.29475	-41026.573
348	.096396	0.0	-8768.8845	2542.97176	-1717.0371	-740.58931	2457.62639	-37544.774
349	.096673	0.0	-8446.8635	1815.11088	-1197.0412	-1033.3914	2230.43265	-33819.141
350	.09695	0.0	-8049.4088	820.646072	-668.20713	-1318.2884	1986.49557	-29870.074
351	.097227	0.0	-7518.8154	-1.1550546	-134.52245	-1593.1974	1727.71981	-25737.284

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p9)

```
   352    .097504          0.0   -6921.311 -1056.1973 400.003353 -1856.1075 1456.10412   -21453.24
   353    .097781          0.0  -6197.8331 -1911.5258 931.365585 -2105.0979 1173.73236  -17068.701
   354    .098058          0.0  -5431.6565 -2958.3505 1455.59338 -2338.3393 882.745964  -12625.022
   355    .098335          0.0  -4561.2034 -3773.4329 1968.77448  -2554.111 585.336524  -8179.2746
   356    .098612          0.0  -3684.8899 -4737.9792 2467.08161 -2750.8026 283.720951  -3775.6765
   357    .098889          0.0  -2734.8397 -5442.8459   2946.796 -2926.9327 -19.863257  529.235216
   358    .099166          0.0  -1820.6061 -6263.8684 3404.33202 -3081.1522 -323.17986  4695.46241
   359    .099443          0.0  -862.97607 -6809.2245 3836.26062  -3212.264 -623.99662  8673.67798
   360     .09972          0.0  21.5301479 -7451.9461 4239.33319 -3319.2277 -920.10554  12433.7873
   361    .099997          0.0  927.553673 -7818.0069 4610.50543 -3401.1799 -1209.3255  15937.8875

Request for character (line printer) plotting.      |  PRINTER PLOT
Blank card terminating all plot cards.              |BLANK CARD ENDING PLOT REQUEST.
Actual List Sizes for the preceding solution follow.        29-Sep-96  00.52.10
   Size  1-10:     21     24     28      6    101      4     24      0      0      0
   Size 11-20:      0      7  -9999  -9999  -9999      0      0      0     23      0
   Size 21-29:      0      0     80      0  -9999  -9999  -9999  -9999  -9999
Seconds for overlays  1-5  :     10.604      0.000     10.604   -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays  6-11 :      0.385      0.000      0.385
Seconds for overlays 12-15 :      0.275      0.000      0.275
Seconds for time-step loop :      0.769      0.000      0.769
Seconds after DELTAT-loop  :      0.055      0.000      0.055
                                 ---------------------------
                   Totals  :     12.088      0.000     12.088

Alternative Transients Program (ATP), Salford 80386 translation.  All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 29-Sep-96  00.52.10    Name of disk plot file, if any, is  C:69290052.pl4
Consult the 800-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTP User Group in Portland,  Oregon, USA.   Program is no older than July, 1993.
Total size of LABCOM tables =  2003949   INTEGER words.   VARDIM  List Sizes follow :   3002  3000 10000   340 20000  1200
 13140 120000  460  900  360  900 36400   255 64800   384    45   254 120000 100000  3000 12000 40000   24 30000  3000   600 126000
-----------------------------------------------------+-----------------------------------------------------------------------------
Descriptive interpretation of input data cards.     |  Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
                                                    0         1         2         3         4         5         6         7         8
1.23456789012345E+79
-----------------------------------------------------+-----------------------------------------------------------------------------
Marker card preceding new EMTP data case.           |BEGIN NEW DATA CASE
Blank card to terminate EMTP execution.             |BLANK
```

Listagem 5.2 - Ficheiro (exemplo4.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito fase-terra no barramento de dois geradores (p10)

Anexo E

Listagem 7.2

```
   ---    156   cards of disk file read into card cache cells  1   onward.
Alternative Transients Program (ATP), Salford 80386 translation.  All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 05-Oct-96  10.31.12    Name of disk plot file, if any, is  C:EXEMPLO5.pl4
Consult the 800-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTP User Group in Portland,  Oregon, USA.   Program is no older than July, 1993.
Total size of LABCOM tables =  2003949   INTEGER words.   VARDIM  List Sizes follow :   3002  3000 10000   340 20000  1200
 13140 120000  460  900  360  900 36400   255 64800   384    45   254 120000 100000  3000 12000 40000   24 30000  3000   600 126000
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Descriptive interpretation of input data cards.   |  Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
                                                  0         1         2         3         4         5         6         7         8

1.23456789012345E+79
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C data:EXEMPLO5.DAT
Marker card preceding new EMTP data case.         |BEGIN NEW DATA CASE
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Ficheiro - EXEMPLO5.DAT
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
New power frequency  STATFR = 5.00000000E+01  Hz. |POWER FREQUENCY, 50
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Defini‡Æo de dados gerais reais
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C DELTAT    TMAX    XOPT    COPT  EPSILN  TOLMAT  TSTART
Misc. data.      2.780E-04   1.000E-01   5.000E+01 |0.000278   0.100    50.0    50.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Defini‡Æo de dados gerais inteiros
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C   IOUT   IPLOT  IDOUBL  KSSOUT  MAXOUT    IPUN  MEMSAV    ICAT  NENERG  IPRSUP
Misc. data.       1    1  0  0  0  0  0  0  0  0  |       1       1                                0
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Defini‡Æo de dados dos ramos
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Impedancia da fonte
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C BUS1  BUS2  BUS3  BUS4       R      L      C
Series R-L-C.    0.000E+00  5.726E-04  0.000E+00  |  NO1A  NO2A                  0.1799
Series R-L-C.    0.000E+00  5.726E-04  0.000E+00  |  NO1B  NO2B                  0.1799
Series R-L-C.    0.000E+00  5.726E-04  0.000E+00  |  NO1C  NO2C                  0.1799
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C Linha em equivalente PI (sem acoplamentos)
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C BUS1  BUS2  BUS3  BUS4       R      L      C      R      L      C      R      L      C
Begin coupled, lumped elements using [R], [L].    |  USE RL
1st of PI-ckt.     8.330E-02  7.429E-04  0.000E+00 | 1NO3A  NO4A              0.08330.2334   0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 8.330E-02 7.429E-04| 2NO3B  NO4B                                0.08330.2334   0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00| 3NO3C  NO4C                                                0.08330.2334   0
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
1st of PI-ckt.     2.350E-02  2.094E-04  0.000E+00 | 1NO6A  NO7A              0.02350.0658   0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 2.350E-02 2.094E-04| 2NO6B  NO7B                                0.02350.0658   0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00| 3NO6C  NO7C                                                0.02350.0658   0
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
1st of PI-ckt.     2.100E-03  6.685E-06  0.000E+00 | 1NO9A  NO10A             0.00210.0021   0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 2.100E-03 6.685E-06| 2NO9B  NO10B                               0.00210.0021   0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00| 3NO9C  NO10C                                               0.00210.0021   0
Comment card.    KOMPAR = 1.                      |C
1st of PI-ckt.     2.010E-02  1.795E-04  0.000E+00 | 1NO8A  NO11A             0.02010.0564   0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 2.010E-02 1.795E-04| 2NO8B  NO11B                               0.02010.0564   0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00| 3NO8C  NO11C                                               0.02010.0564   0
```

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p1)

```
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
1st of Pi-ckt.      4.360E-02   3.890E-04   0.000E+00          | 1NO5A   NO11A                0.04360.1222      0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 4.360E-02 3.890E-04             | 2NO5B   NO11B                                    0.04360.1222      0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00             | 3NO5C   NO11C                                                      0.04360.1222      0
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
1st of Pi-ckt.      4.480E-02   3.992E-04   0.000E+00          | 1NO12A   NO13A               0.04480.1254      0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 4.480E-02 3.992E-04             | 2NO12B   NO13B                                   0.04480.1254      0
 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00             | 3NO12C   NO13C                                                     0.04480.1254      0
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C Transformador
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Sat. Xformer.       0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00          |   TRANSFORMER                                  TRAN A
Special termination-of-points card.                            |          9999
  Winding 1.    0.0000E+00   4.3200E+00   3.4680E+01           | 1NO13A                                  4.320   34.68
  Winding 2.    0.0000E+00   7.6000E-02   1.3800E+01           | 2NO14A NO14C                            0.076   13.80
Transformer copy using reference name   'TRAN A'              |   TRANSFORMER TRAN A                           TRAN B
  Winding 1.    (No values read, since copy)                   | 1NO13B
  Winding 2.    (No values read, since copy)                   | 2NO14B NO14A
Transformer copy using reference name   'TRAN A'              |   TRANSFORMER TRAN A                           TRAN C
  Winding 1.    (No values read, since copy)                   | 1NO13C
  Winding 2.    (No values read, since copy)                   | 2NO13C NO14B
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C ----- Connectivity capacitors
Series R-L-C.       0.000E+00   0.000E+00   3.183E-09          |   NO15A                                         1.0
Series R-L-C.       0.000E+00   0.000E+00   3.183E-09          |   NO15B                                         1.0
Series R-L-C.       0.000E+00   0.000E+00   3.183E-09          |   NO15C                                         1.0
Blank card ending branches.   IBR, NTOT = 33   52              |BLANK CARD ENDING BRANCH DATA.
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C Defini‡Æo dos dados dos interruptores
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C Interruptor principal
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C BUS1   BUS2        TCLOSE      TOPEN          IE
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO2A   NO3A          -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO2B   NO3B          -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO2C   NO3C          -1.0        1.1          0.0      0
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO4A   NO5A          -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO4B   NO5B          -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO4C   NO5C          -1.0        1.1          0.0      0
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO4A   NO6A          -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO4B   NO6B          -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO4C   NO6C          -1.0        1.1          0.0      0
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO7A   NO8A          -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO7B   NO8B          -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO7C   NO8C          -1.0        1.1          0.0      0
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO7A   NO9A          -1.0        1.1          0.0      1
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO7B   NO9B          -1.0        1.1          0.0      1
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO7C   NO9C          -1.0        1.1          0.0      1
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO11A  NO12A         -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO11B  NO12B         -1.0        1.1          0.0      0
Switch.    -1.00E+00   1.10E+00   0.00E+00   0.00E+00          |   NO11C  NO12C         -1.0        1.1          0.0      0
Comment card.     KOMPAR = 1.                                  |C
```

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p2)

```
Switch.   -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00  |  NO14A NO15A        -1.0        1.1        0.0                                  0
Switch.   -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00  |  NO14B NO15B        -1.0        1.1        0.0                                  0
Switch.   -1.00E+00  1.10E+00  0.00E+00  0.00E+00  |  NO14C NO15C        -1.0        1.1        0.0                                  0
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C Interruptor que cria o curto-circuito
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C BUS1  BUS2       TCLOSE      TOPEN        IE
Switch.    4.00E-02  1.00E+00  0.00E+00  0.00E+00  |  NO10A            40.E-3       1.0        0.0                                  1
Switch.    4.00E-02  1.00E+00  0.00E+00  0.00E+00  |  NO10B            40.E-3       1.0        0.0                                  1
Switch.    4.00E-02  1.00E+00  0.00E+00  0.00E+00  |  NO10C            40.E-3       1.0        0.0                                  1
Blank card ending switches.   KSWTCH = 24.         |BLANK CARD ENDING SWITCH DATA.
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C ----- Infinite bus voltages
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C
Source.    4.90E+04  5.00E+01  0.00E+00 -1.00E+00  |14NO1A        48990     50.0        0.0                                  -1.0
Source.    4.90E+04  5.00E+01 -1.20E+02 -1.00E+00  |14NO1B        48990     50.0     -120.0                                  -1.0
Source.    4.90E+04  5.00E+01  1.20E+02 -1.00E+00  |14NO1C        48990     50.0      120.0                                  -1.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C ----- Synchronous machine specifications
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C
Source.    1.17E+04  5.00E+01  3.40E+01 -9.99E+03  |59NO15A    11718.36     50.0       34.0
2nd phase of S.M.    1.17184E+04     -86.00        |  NO15B
3rd phase of S.M.    1.17184E+04    -206.00        |  NO15C
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C ----- First generator
  Optimize Park's data.       2.000E+00            |PARAMETER FITTING        2.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C --- Machine ratings
  4th S.M. card.    1  1  0  0  8  0.550  0.550    | 1 1     8       0.55       0.55      90.0       13.8      280.0
  q-axis.    0.000     0.0000     0.0000     0.0000 |BLANK CARD - NO SATURATION MODELING
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C --- Machine parameters - manufacturer's data
  5th S.M. card.      0.0380     0.2200     1.2000  | 0.038      0.220      1.200      0.700      0.350      0.700      0.250      0.230
  6th S.M. card.      6.2400     0.0000     0.0320  | 6.240                 0.032      0.060      0.150
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C --- Mechanical system data
  Mass card  1 1  1.000E+00  3.116E+00  0.000E+00  | 1          1.0        3.116092
 Blank card terminating S.M. mass cards.           |BLANK CARD ENDING MASS CARDS
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C --- Output data request
 Blank card terminating S.M. output requests.      |BLANK CARD ENDING OUTPUT REQUEST
  End of  0   TACS interfaces.  Parallel follows.  |  FINISH PART
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C ----- Second generator
  Optimize Park's data.       2.000E+00            |PARAMETER FITTING        2.0
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C --- Machine ratings
  4th S.M. card.    1  1  0  0  8  0.450  0.450    | 1 1     8       0.45       0.45      76.0       13.8      250.0
  q-axis.    0.000     0.0000     0.0000     0.0000 |BLANK CARD - NO SATURATION MODELING
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C --- Machine parameters - manufacturer's data
  5th S.M. card.      0.0040     0.1750     1.1500  | 0.004      0.175      1.150      0.685      0.310      0.685      0.210      0.182
  6th S.M. card.      5.8500     0.0000     0.0360  | 5.850                 0.036      0.073      0.132
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C --- Mechanical system data
  Mass card  1 1  1.000E+00  3.333E+00  0.000E+00  | 1          1.0        3.333065
 Blank card terminating S.M. mass cards.           |BLANK CARD ENDING MASS CARDS
Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C --- Output data request
 Blank card terminating S.M. output requests.      |BLANK CARD ENDING OUTPUT REQUEST
  End of  0   S.M.-TACS interface variables.       |  FINISH
Blank card ends electric network sources.          |BLANK CARD ENDING SOURCE DATA.
     Total network loss  P-loss  by summing injections =    5.068491250409E-07

Comment card.    KOMPAR = 1.                       |C ----- Node voltage output request
```

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p3)

```
  ++++  Type-59 S.M. number 1  begins operation on segments 0  and 0.
  ++++  Type-59 S.M. number 2  begins operation on segments 0  and 0.
Card of names for time-step loop output.            |  NO10A NO10B NO10C
Blank card ending requests for output variables.  |BLANK CARD ENDING SELECTIVE NODE VOLTAGE OUTPUT REQUEST.

Column headings for the  9   EMTP output variables follow.  These are divided among the 5 possible classes as follows ....
  First   3      output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
  Next    6      output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);
   Step        Time        NO10A        NO10B        NO10C        NO7A         NO7B         NO7C         NO10A        NO10B        NO10C
                                                                  NO9A         NO9B         NO9C         TERRA        TERRA        TERRA

 ***        Phasor I(0) =   1.3280538E-09                                Switch  "NO2A  "  to  "NO3A  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -1.8098092E-09                                 Switch  "NO2B  "  to  "NO3B  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) =   5.2924065E-10                                Switch  "NO2C  "  to  "NO3C  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) =   3.6617820E-10                                Switch  "NO4A  "  to  "NO5A  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -4.6097171E-10                                 Switch  "NO4B  "  to  "NO5B  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) =   7.4138029E-11                                Switch  "NO4C  "  to  "NO5C  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) =   9.6550679E-10                                Switch  "NO4A  "  to  "NO6A  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -1.3801014E-09                                 Switch  "NO4B  "  to  "NO6B  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) =   4.4267523E-10                                Switch  "NO4C  "  to  "NO6C  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -3.5072389E-10                                 Switch  "NO7A  "  to  "NO8A  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) =   4.8441962E-10                                Switch  "NO7B  "  to  "NO8B  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -1.9144863E-10                                 Switch  "NO7C  "  to  "NO8C  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) =   1.3361330E-09                                Switch  "NO7A  "  to  "NO9A  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -1.8264927E-09                                 Switch  "NO7B  "  to  "NO9B  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) =   5.1934990E-10                                Switch  "NO7C  "  to  "NO9C  "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -1.2171597E-11                                 Switch  "NO11A "  to  "NO12A "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -5.3518079E-11                                 Switch  "NO11B "  to  "NO12B "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -1.2698820E-10                                 Switch  "NO11C "  to  "NO12C "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -4.9624305E-11                                 Switch  "NO14A "  to  "NO15A "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -3.3395509E-11                                 Switch  "NO14B "  to  "NO15B "  closed in the steady-state.
 ***        Phasor I(0) = -4.2916781E-12                                 Switch  "NO14C "  to  "NO15C "  closed in the steady-state.
      0          0.0        48990.      -24495.      -24495.  .133613E-8  -.18265E-8   .51935E-9          0.0          0.0          0.0
      1     .278E-3   48803.2801  -20700.969  -28102.311  .55355E-10  -.2003E-10  -.2099E-10          0.0          0.0          0.0
      2     .556E-3   48244.5435  -16749.139  -31495.405  .57616E-10  -.1608E-10  -.2972E-10          0.0          0.0          0.0
      3     .834E-3   47318.0496  -12669.634  -34648.416  .37248E-10  -.1163E-10  -.2996E-10          0.0          0.0          0.0
      4     .001112   46030.8607  -8493.5511   -37537.31  .42093E-10  -.8764E-11  -.4041E-10          0.0          0.0          0.0
      5      .00139   44392.7887  -4252.7239  -40140.065  .42778E-10  -.4358E-11  -.3038E-10          0.0          0.0          0.0
      6     .001668   42416.3204  20.5208826  -42436.841  .43158E-10  .21522E-13  -.2861E-10          0.0          0.0          0.0
      7     .001946   40116.5218  4293.60925  -44410.131  .48886E-10  .51328E-11  -.3437E-10          0.0          0.0          0.0
      8     .002224    37510.924   8533.9684  -46044.892  .34367E-10  .10028E-10  -.3098E-10          0.0          0.0          0.0
      9     .002502   34619.3887   12709.275  -47328.664   .3139E-10  .11553E-10  -.2657E-10          0.0          0.0          0.0
     10      .00278   31463.9575  16787.7016  -48251.659  .33666E-10  .16301E-10  -.5411E-10          0.0          0.0          0.0
     11     .003058   28068.6835  20738.1593  -48806.843  .29727E-10  .21791E-10  -.5312E-10          0.0          0.0          0.0
     12     .003336   24459.4482  24530.5346  -48989.983  .27851E-10  .23687E-10  -.4421E-10          0.0          0.0          0.0
     13     .003614   20663.7639  28135.9191  -48799.683  .16754E-10  .27971E-10  -.3835E-10          0.0          0.0          0.0
     14     .003892   16710.5644  31526.8297  -48237.394  .13933E-10  .29749E-10  -.3705E-10          0.0          0.0          0.0
     15      .00417   12629.9839  34677.4183  -47307.402  .11937E-10  .29573E-10  -.3863E-10          0.0          0.0          0.0
     16     .004448   8453.12793  37563.6687  -46016.797   .7486E-11  .40083E-10   -.366E-10          0.0          0.0          0.0
     17     .004726   4211.83559  40163.5795  -44375.415  .43987E-11  .44141E-10  -.3758E-10          0.0          0.0          0.0
     18     .005004   -61.562633  42457.3323   -42395.77  -.6544E-13  .43441E-10  -.4452E-10          0.0          0.0          0.0
     19     .005282   -4334.4916  44427.4423  -40092.951  -.4255E-11  .38483E-10  -.3463E-10          0.0          0.0          0.0
     20      .00556   -8574.3797  46058.8918  -37484.512  -.8588E-11  .43409E-10  -.3952E-10          0.0          0.0          0.0
     21     .005838   -12748.907  47339.2446  -34590.337  -.1334E-10   .4635E-10  -.3908E-10          0.0          0.0          0.0
     22     .006116   -16826.253  48258.7408  -31432.488  -.1708E-10  .53262E-10  -.2674E-10          0.0          0.0          0.0
     23     .006394   -20775.335  48810.3713  -28035.036  -.2168E-10  .52815E-10  -.2447E-10          0.0          0.0          0.0
```

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p4)

24	.006672	-24566.052	48989.9312	-24423.879	-.2562E-10	.48541E-10	-.2146E-10	0.0	0.0	0.0
25	.00695	-28169.507	48796.0518	-20626.544	-.3115E-10	.48491E-10	-.167E-10	0.0	0.0	0.0
26	.007228	-31558.233	48230.2109	-16671.978	-.2987E-10	.44398E-10	-.1853E-10	0.0	0.0	0.0
27	.007506	-34706.397	47296.7218	-12590.325	-.3733E-10	.49546E-10	-.1212E-10	0.0	0.0	0.0
28	.007784	-37590.002	46002.7003	-8412.6988	-.3909E-10	.45075E-10	-.7667E-11	0.0	0.0	0.0
29	.008062	-40187.066	44358.0104	-4170.9443	-.409E-10	.3698E-10	-.2886E-11	0.0	0.0	0.0
30	.00834	-42477.794	42375.1893	102.604341	-.4028E-10	.41119E-10	.79367E-13	0.0	0.0	0.0
31	.008618	-44444.722	40069.3515	4375.37088	-.3993E-10	.36668E-10	.41893E-11	0.0	0.0	0.0
32	.008896	-46072.859	37458.074	8614.78491	-.3923E-10	.34929E-10	.67475E-11	0.0	0.0	0.0
33	.009174	-47349.792	34561.2618	12788.5304	-.4522E-10	.33985E-10	.11954E-10	0.0	0.0	0.0
34	.009452	-48265.789	31400.9969	16864.7917	-.5031E-10	.33504E-10	.16446E-10	0.0	0.0	0.0
35	.00973	-48813.866	28001.3691	20812.4964	-.505E-10	.25272E-10	.18891E-10	0.0	0.0	0.0
36	.010008	-48989.845	24388.2931	24601.5522	-.4378E-10	.22647E-10	.19517E-10	0.0	0.0	0.0
37	.010286	-48792.386	20589.3106	28203.0757	-.4324E-10	.23161E-10	.23952E-10	0.0	0.0	0.0
38	.010564	-48222.994	16633.3803	31589.6135	-.4898E-10	.16199E-10	.33122E-10	0.0	0.0	0.0
39	.010842	-47286.008	12550.6574	34735.3507	-.4275E-10	.13446E-10	.33593E-10	0.0	0.0	0.0
40	.01112	-45988.572	8372.26373	37616.308	-.3993E-10	.94462E-11	.35451E-10	0.0	0.0	0.0
41	.011398	-44340.575	4130.0501	40210.5245	-.3634E-10	.44453E-11	.38069E-10	0.0	0.0	0.0
42	.011676	-42354.579	-143.64598	42498.2251	-.3904E-10	-.1287E-12	.38746E-10	0.0	0.0	0.0
43	.011954	-40045.724	-4416.2471	44461.9712	-.3834E-10	-.4137E-11	.40538E-10	0.0	0.0	0.0
44	.012232	-37431.61	-8655.1841	46086.7936	-.3997E-10	-.9023E-11	.38811E-10	0.0	0.0	0.0
45	.01251	-34532.182	-12828.145	47360.3066	-.3755E-10	-.1273E-10	.33655E-10	0.0	0.0	0.0
46	.012788	-31369.484	-16903.319	48272.8025	-.3176E-10	-.1767E-10	.37316E-10	0.0	0.0	0.0
47	.013066	-27967.682	-20849.643	48817.3255	-.2701E-10	-.1993E-10	.45919E-10	0.0	0.0	0.0
48	.013344	-24352.69	-24637.035	48989.7249	-.2508E-10	-.2704E-10	.42522E-10	0.0	0.0	0.0
49	.013622	-20552.062	-28236.624	48788.6865	-.2086E-10	-.3054E-10	.41974E-10	0.0	0.0	0.0
50	.0139	-16594.771	-31620.972	48215.7428	-.2048E-10	-.3316E-10	.45155E-10	0.0	0.0	0.0
51	.014178	-12510.981	-34764.28	47275.2612	-.1215E-10	-.3491E-10	.35252E-10	0.0	0.0	0.0
52	.014456	-8331.8228	-37642.588	45974.4108	-.9842E-11	-.3385E-10	.32481E-10	0.0	0.0	0.0
53	.014734	-4089.153	-40233.955	44323.1076	-.431E-11	-.3955E-10	.3299E-10	0.0	0.0	0.0
54	.015012	184.687511	-42518.627	42333.9393	.16828E-12	-.4876E-10	.33271E-10	0.0	0.0	0.0
55	.01529	4457.12019	-44479.189	40022.0687	.40095E-11	-.5046E-10	.39201E-10	0.0	0.0	0.0
56	.015568	8695.57723	-46100.696	37405.1188	.9051E-11	-.4859E-10	.36435E-10	0.0	0.0	0.0
57	.015846	12867.7498	-47370.788	34503.038	.12073E-10	-.4745E-10	.35683E-10	0.0	0.0	0.0
58	.016124	16941.8344	-48279.783	31337.9481	.17828E-10	-.4535E-10	.28116E-10	0.0	0.0	0.0
59	.016402	20886.7751	-48820.751	27933.9761	.24349E-10	-.4981E-10	.21641E-10	0.0	0.0	0.0
60	.01668	24672.5006	-48989.57	24317.0696	.27164E-10	-.4977E-10	.20683E-10	0.0	0.0	0.0
61	.016958	28270.1532	-48784.953	20514.7994	.27159E-10	-.4369E-10	.18733E-10	0.0	0.0	0.0
62	.017236	31652.3086	-48208.458	16556.1495	.34282E-10	-.4674E-10	.16131E-10	0.0	0.0	0.0
63	.017514	34793.1854	-47264.481	12471.2957	.39707E-10	-.38E-10	.11051E-10	0.0	0.0	0.0
64	.017792	37668.8416	-45960.218	8291.37603	.37428E-10	-.4691E-10	.7272E-11	0.0	0.0	0.0
65	.01807	40257.3566	-44305.61	4048.25302	.41522E-10	-.4396E-10	.36984E-11	0.0	0.0	0.0
66	.018348	42538.9986	-42313.27	-225.72892	.41693E-10	-.4754E-10	-.2039E-12	0.0	0.0	0.0
67	.018626	44496.3753	-39998.385	-4497.9902	.39407E-10	-.3578E-10	-.2878E-11	0.0	0.0	0.0
68	.018904	46114.5661	-37378.602	-8735.9643	.41011E-10	-.3606E-10	-.7361E-11	0.0	0.0	0.0
69	.019182	47381.2357	-34473.89	-12907.346	.51786E-10	-.3583E-10	-.1119E-10	0.0	0.0	0.0
70	.01946	48286.7287	-31306.391	-16980.338	.4782E-10	-.3151E-10	-.1375E-10	0.0	0.0	0.0
71	.019738	48824.1427	-27900.25	-20923.893	.50457E-10	-.288E-10	-.1625E-10	0.0	0.0	0.0
72	.020016	48989.3811	-24281.432	-24707.949	.48008E-10	-.2617E-10	-.2362E-10	0.0	0.0	0.0
73	.020294	48781.1843	-20477.522	-28303.662	.57446E-10	-.2044E-10	-.2307E-10	0.0	0.0	0.0
74	.020572	48201.1394	-16517.517	-31683.623	.49074E-10	-.1797E-10	-.2561E-10	0.0	0.0	0.0
75	.02085	47253.6679	-12431.602	-34822.066	.42304E-10	-.1144E-10	-.2252E-10	0.0	0.0	0.0
76	.021128	45945.9922	-8250.9234	-37695.069	.43455E-10	-.945E-11	-.3102E-10	0.0	0.0	0.0
77	.021406	44288.0804	-4007.3502	-40280.73	.37836E-10	-.396E-11	-.2699E-10	0.0	0.0	0.0
78	.021684	42292.5704	266.770163	-42559.341	.40302E-10	.27418E-12	-.4324E-10	0.0	0.0	0.0

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p5)

79	.021962	39974.6735	4538.857	-44513.531	.43039E-10	.48206E-11	-.3784E-10	0.0	0.0	0.0
80	.02224	37352.0586	8776.34514	-46128.404	.33864E-10	.77498E-11	-.3366E-10	0.0	0.0	0.0
81	.022518	34444.7172	12946.9332	-47391.65	.37211E-10	.12409E-10	-.4604E-10	0.0	0.0	0.0
82	.022796	31274.8114	17018.8296	-48293.641	.35079E-10	.19083E-10	-.4852E-10	0.0	0.0	0.0
83	.023074	27866.5047	20960.9952	-48827.5	.28999E-10	.22948E-10	-.4095E-10	0.0	0.0	0.0
84	.023352	24245.7777	24743.3799	-48989.158	.24216E-10	.24102E-10	-.3233E-10	0.0	0.0	0.0
85	.02363	20440.2306	28337.1512	-48777.382	.20694E-10	.26226E-10	-.4501E-10	0.0	0.0	0.0
86	.023908	16478.8722	31714.9148	-48193.787	.19699E-10	.32918E-10	-.5188E-10	0.0	0.0	0.0
87	.024186	12391.899	34850.9226	-47242.822	.11E-10	.37305E-10	-.4261E-10	0.0	0.0	0.0
88	.024464	8210.46505	37721.2695	-45931.735	.81464E-11	.36096E-10	-.3895E-10	0.0	0.0	0.0
89	.024742	3966.44458	40304.0756	-44270.52	.39577E-11	.38566E-10	-.4092E-10	0.0	0.0	0.0
90	.02502	-307.81122	42579.8527	-42271.841	-.2544E-12	.37609E-10	-.2846E-10	0.0	0.0	0.0
91	.025298	-4579.7206	44530.6545	-39950.934	-.4641E-11	.48251E-10	-.2982E-10	0.0	0.0	0.0
92	.025576	-8816.7199	46142.2091	-37325.489	-.9214E-11	.45352E-10	-.3496E-10	0.0	0.0	0.0
93	.025854	-12986.511	47402.0318	-34415.521	-.1177E-10	.4689E-10	-.2251E-10	0.0	0.0	0.0
94	.026132	-17057.309	48300.5194	-31243.21	-.1872E-10	.4726E-10	-.2876E-10	0.0	0.0	0.0
95	.02641	-20998.083	48830.8228	-27832.74	-.1985E-10	.47658E-10	-.2367E-10	0.0	0.0	0.0
96	.026688	-24778.793	48988.8997	-24210.106	-.2276E-10	.5077E-10	-.1787E-10	0.0	0.0	0.0
97	.026966	-28370.62	48773.5452	-20402.925	-.3056E-10	.54939E-10	-.1534E-10	0.0	0.0	0.0
98	.027244	-31746.184	48186.4007	-16440.216	-.3207E-10	.53104E-10	-.1286E-10	0.0	0.0	0.0
99	.027522	-34879.754	47231.942	-12352.188	-.3448E-10	.41521E-10	-.1038E-10	0.0	0.0	0.0
100	.0278	-37747.444	45917.4447	-8170.0009	-.3566E-10	.40234E-10	-.6962E-11	0.0	0.0	0.0
101	.028078	-40327.393	44252.9289	-3925.5362	-.4006E-10	.50965E-10	-.354E-11	0.0	0.0	0.0
102	.028356	-42599.935	42251.0828	348.852066	-.4177E-10	.47619E-10	.33011E-12	0.0	0.0	0.0
103	.028634	-44547.747	39927.1662	4620.58107	-.4418E-10	.35735E-10	.41636E-11	0.0	0.0	0.0
104	.028912	-46155.982	37298.8936	8857.08842	-.4301E-10	.33616E-10	.54645E-11	0.0	0.0	0.0
105	.02919	-47412.38	34386.2998	13026.0801	-.511E-10	.31466E-10	.11334E-10	0.0	0.0	0.0
106	.029468	-48307.364	31211.5869	17095.777	-.5111E-10	.31786E-10	.18407E-10	0.0	0.0	0.0
107	.029746	-48834.111	27798.955	21035.1565	-.5406E-10	.26954E-10	.14604E-10	0.0	0.0	0.0
108	.030024	-48988.607	24174.4179	24814.1896	-.4662E-10	.23354E-10	.21227E-10	0.0	0.0	0.0
109	.030302	-48769.674	20365.6045	28404.0697	-.5089E-10	.22425E-10	.26734E-10	0.0	0.0	0.0
110	.03058	-48178.981	16401.5486	31777.4319	-.477E-10	.19686E-10	.278E-10	0.0	0.0	0.0
111	.030858	-47221.029	12312.4674	34908.5618	-.3759E-10	.11026E-10	.31271E-10	0.0	0.0	0.0
112	.031136	-45903.123	8129.53102	37773.5915	-.4454E-10	.7951E-11	.33292E-10	0.0	0.0	0.0
113	.031414	-44235.306	3884.62499	40350.6815	-.4412E-10	.42435E-11	.3473E-10	0.0	0.0	0.0
114	.031692	-42230.295	-389.89266	42620.1872	-.4103E-10	-.3751E-12	.32498E-10	0.0	0.0	0.0
115	.03197	-39903.37	-4661.4383	44564.8087	-.3711E-10	-.5441E-11	.36129E-10	0.0	0.0	0.0
116	.032248	-37272.272	-8897.4507	46169.7225	-.354E-10	-.9139E-11	.33829E-10	0.0	0.0	0.0
117	.032526	-34357.055	-13065.64	47422.6948	-.3507E-10	-.1188E-10	.47883E-10	0.0	0.0	0.0
118	.032804	-31179.942	-17134.233	48314.1744	-.3027E-10	-.1699E-10	.45491E-10	0.0	0.0	0.0
119	.033082	-27765.151	-21072.215	48837.3658	-.2581E-10	-.2182E-10	.43663E-10	0.0	0.0	0.0
120	.03336	-24138.712	-24849.588	48988.2809	-.262E-10	-.2295E-10	.41231E-10	0.0	0.0	0.0
121	.033638	-20328.27	-28437.499	48765.7691	-.2404E-10	-.2883E-10	.37993E-10	0.0	0.0	0.0
122	.033916	-16382.87	-31808.657	48171.5267	-.1415E-10	-.2865E-10	.42792E-10	0.0	0.0	0.0
123	.034194	-12272.739	-34937.345	47210.0834	-.1159E-10	-.3844E-10	.34525E-10	0.0	0.0	0.0
124	.034472	-8089.0554	-37799.713	45888.7682	-.6998E-11	-.3359E-10	.30941E-10	0.0	0.0	0.0
125	.03475	-3843.7111	-40373.942	44217.6531	-.3582E-11	-.4181E-10	.42819E-10	0.0	0.0	0.0
126	.035028	430.93299	-42640.41	42209.4766	.44853E-12	-.4233E-10	.38918E-10	0.0	0.0	0.0
127	.035306	4702.29217	-44581.839	39879.5467	.43818E-11	-.4837E-10	.36041E-10	0.0	0.0	0.0
128	.035584	8937.80683	-46183.431	37245.6238	.89657E-11	-.4711E-10	.3196E-10	0.0	0.0	0.0
129	.035862	13105.1906	-47432.976	34327.7858	.10493E-10	-.5029E-10	.30935E-10	0.0	0.0	0.0
130	.03614	17172.6763	-48320.951	31148.2748	.15927E-10	-.5063E-10	.28166E-10	0.0	0.0	0.0
131	.036418	21109.2586	-48840.586	27731.3273	.21318E-10	-.4483E-10	.18844E-10	0.0	0.0	0.0
132	.036696	24884.9297	-48987.92	24102.9901	.24848E-10	-.5317E-10	.17028E-10	0.0	0.0	0.0
133	.036974	28470.9085	-48761.83	20290.9212	.29878E-10	-.4639E-10	.19677E-10	0.0	0.0	0.0

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p6)

134	.037252	31839.8599	-48164.039	16324.1791	.33786E-10	-.4845E-10	.12538E-10	0.0	0.0	0.0		
135	.03753	34966.1031	-47199.104	12233.0013	.31289E-10	-.3809E-10	.85651E-11	0.0	0.0	0.0		
136	.037808	37825.8075	-45874.382	8048.57417	.35875E-10	-.39E-10	.87719E-11	0.0	0.0	0.0		
137	.038086	40397.1741	-44199.969	3802.79451	.35968E-10	-.5025E-10	.36779E-11	0.0	0.0	0.0		
138	.038364	42660.6021	-42188.629	-471.97301	.49718E-10	-.4733E-10	-.4008E-12	0.0	0.0	0.0		
139	.038642	44598.8377	-39855.695	-4743.1428	.41879E-10	-.3926E-10	-.3525E-11	0.0	0.0	0.0		
140	.03892	46197.1064	-37218.95	-8978.1566	.42823E-10	-.3476E-10	-.8018E-11	0.0	0.0	0.0		
141	.039198	47443.2247	-34298.493	-13144.732	.43861E-10	-.3268E-10	-.1307E-10	0.0	0.0	0.0		
142	.039476	48327.6938	-31116.586	-17211.108	.50031E-10	-.3256E-10	-.1295E-10	0.0	0.0	0.0		
143	.039754	48843.7718	-27697.484	-21146.288	.48393E-10	-.3017E-10	-.1352E-10	0.0	0.0	0.0		
...						Close switch	"NO10A " to "	"	after	4.00320000E-02	sec.	
...						Close switch	"NO10B " to "	"	after	4.00320000E-02	sec.	
...						Close switch	"NO10C " to "	"	after	4.00320000E-02	sec.	
144	.040032	48987.5244	-24067.251	-24920.274	.49583E-10	-.2197E-10	-.2072E-10	0.0	0.0	0.0		
145	.04031	0.0	0.0	0.0	4549.85206	-1889.9661	-2659.886	4549.85206	-1889.9661	-2659.886		
146	.040588	0.0	0.0	0.0	13506.3484	-5263.4377	-8242.9106	13506.3484	-5263.4377	-8242.9106		
147	.040866	0.0	0.0	0.0	22144.9155	-7820.1848	-14324.731	22144.9155	-7820.1848	-14324.731		
148	.041144	0.0	0.0	0.0	30403.8187	-9555.5835	-20848.235	30403.8187	-9555.5835	-20848.235		
149	.041422	0.0	0.0	0.0	38224.1384	-10470.987	-27753.152	38224.1384	-10470.987	-27753.152		
150	.0417	0.0	0.0	0.0	45550.2211	-10573.718	-34976.503	45550.2211	-10573.718	-34976.503		
151	.041978	0.0	0.0	0.0	52330.1049	-9877.0239	-42453.081	52330.1049	-9877.0239	-42453.081		
152	.042256	0.0	0.0	0.0	58515.9171	-8399.9739	-50115.943	58515.9171	-8399.9739	-50115.943		
153	.042534	0.0	0.0	0.0	64064.2407	-6167.3239	-57896.917	64064.2407	-6167.3239	-57896.917		
154	.042812	0.0	0.0	0.0	68936.4464	-3209.3311	-65727.115	68936.4464	-3209.3311	-65727.115		
155	.04309	0.0	0.0	0.0	73098.9889	438.47168	-73537.461	73098.9889	438.47168	-73537.461		
156	.043368	0.0	0.0	0.0	76523.6635	4735.54204	-81259.206	76523.6635	4735.54204	-81259.206		
157	.043646	0.0	0.0	0.0	79187.8227	9636.63198	-88824.455	79187.8227	9636.63198	-88824.455		
158	.043924	0.0	0.0	0.0	81074.5501	15092.1284	-96166.679	81074.5501	15092.1284	-96166.679		
159	.044202	0.0	0.0	0.0	82172.7905	21048.4266	-103221.22	82172.7905	21048.4266	-103221.22		
160	.04448	0.0	0.0	0.0	82477.4354	27448.3344	-109925.77	82477.4354	27448.3344	-109925.77		
161	.044758	0.0	0.0	0.0	81989.3635	34231.5039	-116220.87	81989.3635	34231.5039	-116220.87		
162	.045036	0.0	0.0	0.0	80715.4345	41334.8869	-122050.32	80715.4345	41334.8869	-122050.32		
163	.045314	0.0	0.0	0.0	78668.4389	48693.2113	-127361.65	78668.4389	48693.2113	-127361.65		
164	.045592	0.0	0.0	0.0	75867.0008	56239.4748	-132106.48	75867.0008	56239.4748	-132106.48		
165	.04587	0.0	0.0	0.0	72335.4376	63905.4512	-136240.89	72335.4376	63905.4512	-136240.89		
166	.046148	0.0	0.0	0.0	68103.5757	71622.2067	-139725.78	68103.5757	71622.2067	-139725.78		
167	.046426	0.0	0.0	0.0	63206.5237	79320.6213	-142527.15	63206.5237	79320.6213	-142527.15		
168	.046704	0.0	0.0	0.0	57684.4066	86931.912	-144616.32	57684.4066	86931.912	-144616.32		
169	.046982	0.0	0.0	0.0	51582.0605	94388.1531	-145970.21	51582.0605	94388.1531	-145970.21		
170	.04726	0.0	0.0	0.0	44948.6919	101622.791	-146571.48	44948.6919	101622.791	-146571.48		
171	.047538	0.0	0.0	0.0	37837.5037	108571.146	-146408.65	37837.5037	108571.146	-146408.65		
172	.047816	0.0	0.0	0.0	30305.2908	115170.904	-145476.2	30305.2908	115170.904	-145476.2		
173	.048094	0.0	0.0	0.0	22412.0077	121362.589	-143774.6	22412.0077	121362.589	-143774.6		
174	.048372	0.0	0.0	0.0	14220.3127	127090.007	-141310.32	14220.3127	127090.007	-141310.32		
175	.04865	0.0	0.0	0.0	5795.09137	132300.678	-138095.77	5795.09137	132300.678	-138095.77		
176	.048928	0.0	0.0	0.0	-2797.0376	136946.23	-134149.19	-2797.0376	136946.23	-134149.19		
177	.049206	0.0	0.0	0.0	-11488.229	140982.764	-129494.53	-11488.229	140982.764	-129494.53		
178	.049484	0.0	0.0	0.0	-20209.927	144371.184	-124161.26	-20209.927	144371.184	-124161.26		
179	.049762	0.0	0.0	0.0	-28893.388	147077.497	-118184.11	-28893.388	147077.497	-118184.11		
180	.05004	0.0	0.0	0.0	-37470.204	149073.064	-111602.86	-37470.204	149073.064	-111602.86		
181	.050318	0.0	0.0	0.0	-45872.819	150334.818	-104462.	-45872.819	150334.818	-104462.		
182	.050596	0.0	0.0	0.0	-54035.051	150845.434	-96810.383	-54035.051	150845.434	-96810.383		
183	.050874	0.0	0.0	0.0	-61892.587	150593.462	-88700.875	-61892.587	150593.462	-88700.875		
184	.051152	0.0	0.0	0.0	-69383.48	149573.411	-80189.93	-69383.48	149573.411	-80189.93		
185	.05143	0.0	0.0	0.0	-76448.616	147785.784	-71337.168	-76448.616	147785.784	-71337.168		

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p7)

186	.051708	0.0	0.0	0.0	-83032.164	145237.076	-62204.912	-83032.164	145237.076	-62204.912
187	.051986	0.0	0.0	0.0	-89082.003	141939.719	-52857.717	-89082.003	141939.719	-52857.717
188	.052264	0.0	0.0	0.0	-94550.116	137911.987	-43361.871	-94550.116	137911.987	-43361.871
189	.052542	0.0	0.0	0.0	-99392.959	133177.852	-33784.893	-99392.959	133177.852	-33784.893
190	.05282	0.0	0.0	0.0	-103571.79	127766.8	-24195.012	-103571.79	127766.8	-24195.012
191	.053098	0.0	0.0	0.0	-107052.96	121713.603	-14660.645	-107052.96	121713.603	-14660.645
192	.053376	0.0	0.0	0.0	-109808.17	115058.051	-5249.8792	-109808.17	115058.051	-5249.8792
193	.053654	0.0	0.0	0.0	-111814.7	107844.65	3970.05535	-111814.7	107844.65	3970.05535
194	.053932	0.0	0.0	0.0	-113055.57	100122.273	12933.2959	-113055.57	100122.273	12933.2959
195	.05421	0.0	0.0	0.0	-113519.65	91943.7956	21575.8522	-113519.65	91943.7956	21575.8522
196	.054488	0.0	0.0	0.0	-113201.78	83365.68	29836.0951	-113201.78	83365.68	29836.0951
197	.054766	0.0	0.0	0.0	-112102.78	74447.5495	37655.2288	-112102.78	74447.5495	37655.2288
198	.055044	0.0	0.0	0.0	-110229.47	65251.7293	44977.7399	-110229.47	65251.7293	44977.7399
199	.055322	0.0	0.0	0.0	-107594.59	55842.7696	51751.8224	-107594.59	55842.7696	51751.8224
200	.0556	0.0	0.0	0.0	-104216.73	46286.9514	57929.7742	-104216.73	46286.9514	57929.7742
201	.055878	0.0	0.0	0.0	-100120.14	36651.7794	63468.3618	-100120.14	36651.7794	63468.3618
202	.056156	0.0	0.0	0.0	-95334.617	27005.4654	68329.1518	-95334.617	27005.4654	68329.1518
203	.056434	0.0	0.0	0.0	-89895.211	17416.4064	72478.8047	-89895.211	17416.4064	72478.8047
204	.056712	0.0	0.0	0.0	-83841.992	7952.66097	75889.3312	-83841.992	7952.66097	75889.3312
205	.05699	0.0	0.0	0.0	-77219.735	-1318.5708	78538.306	-77219.735	-1318.5708	78538.306
206	.057268	0.0	0.0	0.0	-70077.579	-10331.462	80409.041	-70077.579	-10331.462	80409.041
207	.057546	0.0	0.0	0.0	-62468.651	-19022.062	81490.713	-62468.651	-19022.062	81490.713
208	.057824	0.0	0.0	0.0	-54449.662	-27328.786	81778.448	-54449.662	-27328.786	81778.448
209	.058102	0.0	0.0	0.0	-46080.472	-35192.887	81273.3597	-46080.472	-35192.887	81273.3597
210	.05838	0.0	0.0	0.0	-37423.638	-42558.903	79982.5415	-37423.638	-42558.903	79982.5415
211	.058658	0.0	0.0	0.0	-28543.931	-49375.084	77919.0147	-28543.931	-49375.084	77919.0147
212	.058936	0.0	0.0	0.0	-19507.843	-55593.787	75101.6296	-19507.843	-55593.787	75101.6296
213	.059214	0.0	0.0	0.0	-10383.084	-61171.839	71554.9232	-10383.084	-61171.839	71554.9232
214	.059492	0.0	0.0	0.0	-1238.0602	-66070.873	67308.9335	-1238.0602	-66070.873	67308.9335
215	.05977	0.0	0.0	0.0	7858.64476	-70257.616	62398.9715	7858.64476	-70257.616	62398.9715
216	.060048	0.0	0.0	0.0	16838.7944	-73704.148	56865.3532	16838.7944	-73704.148	56865.3532
217	.060326	0.0	0.0	0.0	25635.0194	-76388.113	50753.0931	25635.0194	-76388.113	50753.0931
218	.060604	0.0	0.0	0.0	34181.3319	-78292.894	44111.5625	34181.3319	-78292.894	44111.5625
219	.060882	0.0	0.0	0.0	42413.6283	-79407.742	36994.1141	42413.6283	-79407.742	36994.1141
220	.06116	0.0	0.0	0.0	50270.1792	-79727.855	29457.6759	50270.1792	-79727.855	29457.6759
221	.061438	0.0	0.0	0.0	57692.0994	-79254.418	21562.319	57692.0994	-79254.418	21562.319
222	.061716	0.0	0.0	0.0	64623.7979	-77994.598	13370.7999	64623.7979	-77994.598	13370.7999
223	.061994	0.0	0.0	0.0	71013.4016	-75961.485	4948.08375	71013.4016	-75961.485	4948.08375
224	.062272	0.0	0.0	0.0	76813.151	-73174.001	-3639.1504	76813.151	-73174.001	-3639.1504
225	.06255	0.0	0.0	0.0	81979.7651	-69656.748	-12323.017	81979.7651	-69656.748	-12323.017
226	.062828	0.0	0.0	0.0	86474.7711	-65439.832	-21034.94	86474.7711	-65439.832	-21034.94
227	.063106	0.0	0.0	0.0	90264.7986	-60558.624	-29706.174	90264.7986	-60558.624	-29706.174
228	.063384	0.0	0.0	0.0	93321.8335	-55053.502	-38268.332	93321.8335	-55053.502	-38268.332
229	.063662	0.0	0.0	0.0	95623.4329	-48969.535	-46653.898	95623.4329	-48969.535	-46653.898
230	.06394	0.0	0.0	0.0	97152.8956	-42356.148	-54796.748	97152.8956	-42356.148	-54796.748
231	.064218	0.0	0.0	0.0	97899.3901	-35266.742	-62632.648	97899.3901	-35266.742	-62632.648
232	.064496	0.0	0.0	0.0	97858.0376	-27758.289	-70099.749	97858.0376	-27758.289	-70099.749
233	.064774	0.0	0.0	0.0	97029.9494	-19890.9	-77139.05	97029.9494	-19890.9	-77139.05
234	.065052	0.0	0.0	0.0	95422.2183	-11727.366	-83694.852	95422.2183	-11727.366	-83694.852
235	.06533	0.0	0.0	0.0	93047.8657	-3332.6844	-89715.181	93047.8657	-3332.6844	-89715.181
236	.065608	0.0	0.0	0.0	89925.7417	5226.44246	-95152.184	89925.7417	5226.44246	-95152.184
237	.065886	0.0	0.0	0.0	86080.3824	13882.1081	-99962.491	86080.3824	13882.1081	-99962.491
238	.066164	0.0	0.0	0.0	81541.8228	22565.7219	-104107.54	81541.8228	22565.7219	-104107.54
239	.066442	0.0	0.0	0.0	76345.368	31208.5298	-107553.9	76345.368	31208.5298	-107553.9
240	.06672	0.0	0.0	0.0	70531.3248	39742.1382	-110273.46	70531.3248	39742.1382	-110273.46

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p8)

241	.066998	0.0	0.0	0.0	64144.6943	48099.0336	-112243.73	64144.6943	48099.0336	-112243.73
242	.067276	0.0	0.0	0.0	57234.8291	56213.097	-113447.93	57234.8291	56213.097	-113447.93
243	.067554	0.0	0.0	0.0	49855.0577	64020.1065	-113875.16	49855.0577	64020.1065	-113875.16
244	.067832	0.0	0.0	0.0	42062.278	71458.2264	-113520.5	42062.278	71458.2264	-113520.5
245	.06811	0.0	0.0	0.0	33916.5239	78468.4772	-112385.	33916.5239	78468.4772	-112385.
246	.068388	0.0	0.0	0.0	25480.5076	84995.1848	-110475.69	25480.5076	84995.1848	-110475.69
247	.068666	0.0	0.0	0.0	16819.1424	90986.4038	-107805.55	16819.1424	90986.4038	-107805.55
248	.068944	0.0	0.0	0.0	7999.04757	96394.3127	-104393.36	7999.04757	96394.3127	-104393.36
249	.069222	0.0	0.0	0.0	-911.95906	101175.578	-100263.62	-911.95906	101175.578	-100263.62
250	.0695	0.0	0.0	0.0	-9845.3778	105291.682	-95446.304	-9845.3778	105291.682	-95446.304
251	.069778	0.0	0.0	0.0	-18732.549	108709.218	-89976.669	-18732.549	108709.218	-89976.669
252	.070056	0.0	0.0	0.0	-27505.177	111400.145	-83894.968	-27505.177	111400.145	-83894.968
253	.070334	0.0	0.0	0.0	-36095.848	113341.995	-77246.147	-36095.848	113341.995	-77246.147
254	.070612	0.0	0.0	0.0	-44438.548	114518.051	-70079.503	-44438.548	114518.051	-70079.503
255	.07089	0.0	0.0	0.0	-52469.161	114917.467	-62448.306	-52469.161	114917.467	-62448.306
256	.071168	0.0	0.0	0.0	-60125.963	114535.357	-54409.394	-60125.963	114535.357	-54409.394
257	.071446	0.0	0.0	0.0	-67350.085	113372.824	-46022.739	-67350.085	113372.824	-46022.739
258	.071724	0.0	0.0	0.0	-74085.97	111436.957	-37350.986	-74085.97	111436.957	-37350.986
259	.072002	0.0	0.0	0.0	-80281.79	108740.772	-28458.982	-80281.79	108740.772	-28458.982
260	.07228	0.0	0.0	0.0	-85889.843	105303.116	-19413.273	-85889.843	105303.116	-19413.273
261	.072558	0.0	0.0	0.0	-90866.916	101148.519	-10281.603	-90866.916	101148.519	-10281.603
262	.072836	0.0	0.0	0.0	-95174.616	96307.0095	-1132.3933	-95174.616	96307.0095	-1132.3933
263	.073114	0.0	0.0	0.0	-98779.661	90813.8829	7965.77843	-98779.661	90813.8829	7965.77843
264	.073392	0.0	0.0	0.0	-101654.13	84709.4326	16944.701	-101654.13	84709.4326	16944.701
265	.07367	0.0	0.0	0.0	-103775.69	78038.6423	25737.0503	-103775.69	78038.6423	25737.0503
266	.073948	0.0	0.0	0.0	-105127.75	70850.8424	34276.9033	-105127.75	70850.8424	34276.9033
267	.074226	0.0	0.0	0.0	-105699.57	63199.3336	42500.2403	-105699.57	63199.3336	42500.2403
268	.074504	0.0	0.0	0.0	-105486.41	55140.9796	50345.4339	-105486.41	55140.9796	50345.4339
269	.074782	0.0	0.0	0.0	-104489.49	46735.7736	57753.7189	-104489.49	46735.7736	57753.7189
270	.07506	0.0	0.0	0.0	-102716.02	38046.38	64669.6408	-102716.02	38046.38	64669.6408
271	.075338	0.0	0.0	0.0	-100179.14	29137.6568	71041.4787	-100179.14	29137.6568	71041.4787
272	.075616	0.0	0.0	0.0	-96897.8	20076.1599	76821.6401	-96897.8	20076.1599	76821.6401
273	.075894	0.0	0.0	0.0	-92896.66	10929.6359	81967.0239	-92896.66	10929.6359	81967.0239
274	.076172	0.0	0.0	0.0	-88205.854	1766.50491	86439.3495	-88205.854	1766.50491	86439.3495
275	.07645	0.0	0.0	0.0	-82860.787	-7344.6615	90205.4487	-82860.787	-7344.6615	90205.4487
276	.076728	0.0	0.0	0.0	-76901.856	-16335.663	93237.5193	-76901.856	-16335.663	93237.5193
277	.077006	0.0	0.0	0.0	-70374.144	-25139.193	95513.3369	-70374.144	-25139.193	95513.3369
278	.077284	0.0	0.0	0.0	-63327.077	-33689.348	97016.4248	-63327.077	-33689.348	97016.4248
279	.077562	0.0	0.0	0.0	-55814.046	-41922.134	97736.1801	-55814.046	-41922.134	97736.1801
280	.07784	0.0	0.0	0.0	-47892.001	-49775.953	97667.9546	-47892.001	-49775.953	97667.9546
281	.078118	0.0	0.0	0.0	-39621.015	-57192.076	96813.0907	-39621.015	-57192.076	96813.0907
282	.078396	0.0	0.0	0.0	-31063.826	-64115.086	95178.9115	-31063.826	-64115.086	95178.9115
283	.078674	0.0	0.0	0.0	-22285.362	-70493.304	92778.6651	-22285.362	-70493.304	92778.6651
284	.078952	0.0	0.0	0.0	-13352.241	-76279.183	89631.4241	-13352.241	-76279.183	89631.4241
285	.07923	0.0	0.0	0.0	-4332.2683	-81429.672	85761.9403	-4332.2683	-81429.672	85761.9403
286	.079508	0.0	0.0	0.0	4706.08542	-85906.542	81200.4565	4706.08542	-85906.542	81200.4565
287	.079786	0.0	0.0	0.0	13694.2029	-89676.679	75982.4763	13694.2029	-89676.679	75982.4763
288	.080064	0.0	0.0	0.0	22563.8448	-92712.338	70148.4933	22563.8448	-92712.338	70148.4933
289	.080342	0.0	0.0	0.0	31247.6693	-94991.353	63743.6833	31247.6693	-94991.353	63743.6833
290	.08062	0.0	0.0	0.0	39679.7462	-96497.306	56817.5598	39679.7462	-96497.306	56817.5598
291	.080898	0.0	0.0	0.0	47796.059	-97219.656	49423.5969	47796.059	-97219.656	49423.5969
292	.081176	0.0	0.0	0.0	55534.9933	-97153.815	41618.8219	55534.9933	-97153.815	41618.8219
293	.081454	0.0	0.0	0.0	62837.8067	-96301.188	33463.3811	62837.8067	-96301.188	33463.3811
294	.081732	0.0	0.0	0.0	69649.0761	-94669.157	25020.0812	69649.0761	-94669.157	25020.0812
295	.08201	0.0	0.0	0.0	75917.121	-92271.032	16353.9109	75917.121	-92271.032	16353.9109

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p9)

296	.082288	0.0	0.0	0.0	81594.3969	-89125.943	7531.54593	81594.3969	-89125.943	7531.54593
297	.082566	0.0	0.0	0.0	86637.8583	-85258.699	-1379.1592	86637.8583	-85258.699	-1379.1592
298	.082844	0.0	0.0	0.0	91009.2867	-80699.599	-10309.688	91009.2867	-80699.599	-10309.688
299	.083122	0.0	0.0	0.0	94675.5818	-75484.197	-19191.384	94675.5818	-75484.197	-19191.384
300	.0834	0.0	0.0	0.0	97609.0144	-69653.039	-27955.976	97609.0144	-69653.039	-27955.976
301	.083678	0.0	0.0	0.0	99787.4373	-63251.345	-36536.093	99787.4373	-63251.345	-36536.093
302	.083956	0.0	0.0	0.0	101194.455	-56328.672	-44865.783	101194.455	-56328.672	-44865.783
303	.084234	0.0	0.0	0.0	101819.547	-48938.534	-52881.013	101819.547	-48938.534	-52881.013
304	.084512	0.0	0.0	0.0	101658.151	-41137.992	-60520.159	101658.151	-41137.992	-60520.159
305	.08479	0.0	0.0	0.0	100711.695	-32987.225	-67724.471	100711.695	-32987.225	-67724.471
306	.085068	0.0	0.0	0.0	98987.5878	-24549.063	-74438.524	98987.5878	-24549.063	-74438.524
307	.085346	0.0	0.0	0.0	96499.1622	-15888.519	-80610.643	96499.1622	-15888.519	-80610.643
308	.085624	0.0	0.0	0.0	93265.5737	-7072.2838	-86193.29	93265.5737	-7072.2838	-86193.29
309	.085902	0.0	0.0	0.0	89311.6545	1831.77648	-91143.431	89311.6545	1831.77648	-91143.431
310	.08618	0.0	0.0	0.0	84667.7241	10755.1389	-95422.863	84667.7241	10755.1389	-95422.863
311	.086458	0.0	0.0	0.0	79369.3585	19629.1458	-98998.504	79369.3585	19629.1458	-98998.504
312	.086736	0.0	0.0	0.0	73457.1188	28385.5281	-101842.65	73457.1188	28385.5281	-101842.65
313	.087014	0.0	0.0	0.0	66976.2423	36956.9252	-103933.17	66976.2423	36956.9252	-103933.17
314	.087292	0.0	0.0	0.0	59976.2975	45277.3983	-105253.7	59976.2975	45277.3983	-105253.7
315	.08757	0.0	0.0	0.0	52510.8068	53282.933	-105793.74	52510.8068	53282.933	-105793.74
316	.087848	0.0	0.0	0.0	44636.8378	60911.9266	-105548.76	44636.8378	60911.9266	-105548.76
317	.088126	0.0	0.0	0.0	36414.5691	68105.658	-104520.23	36414.5691	68105.658	-104520.23
318	.088404	0.0	0.0	0.0	27906.8311	74808.7348	-102715.57	27906.8311	74808.7348	-102715.57
319	.088682	0.0	0.0	0.0	19178.6276	80969.5155	-100148.14	19178.6276	80969.5155	-100148.14
320	.08896	0.0	0.0	0.0	10296.6396	86540.5026	-96837.142	10296.6396	86540.5026	-96837.142
321	.089238	0.0	0.0	0.0	1328.71801	91478.7048	-92807.423	1328.71801	91478.7048	-92807.423
322	.089516	0.0	0.0	0.0	-7656.6343	95745.9646	-88089.33	-7656.6343	95745.9646	-88089.33
323	.089794	0.0	0.0	0.0	-16590.784	99309.2486	-82718.465	-16590.784	99309.2486	-82718.465
324	.090072	0.0	0.0	0.0	-25405.491	102140.899	-76735.408	-25405.491	102140.899	-76735.408
325	.09035	0.0	0.0	0.0	-34033.429	104218.846	-70185.417	-34033.429	104218.846	-70185.417
326	.090628	0.0	0.0	0.0	-42408.696	105526.773	-63118.077	-42408.696	105526.773	-63118.077
327	.090906	0.0	0.0	0.0	-50467.321	106054.241	-55586.921	-50467.321	106054.241	-55586.921
328	.091184	0.0	0.0	0.0	-58147.747	105796.773	-47649.027	-58147.747	105796.773	-47649.027
329	.091462	0.0	0.0	0.0	-65391.303	104755.881	-39364.578	-65391.303	104755.881	-39364.578
330	.09174	0.0	0.0	0.0	-72142.653	102939.059	-30796.406	-72142.653	102939.059	-30796.406
331	.092018	0.0	0.0	0.0	-78350.211	100359.722	-22009.511	-78350.211	100359.722	-22009.511
332	.092296	0.0	0.0	0.0	-83966.542	97037.1088	-13070.567	-83966.542	97037.1088	-13070.567
333	.092574	0.0	0.0	0.0	-88948.718	92996.1304	-4047.4121	-88948.718	92996.1304	-4047.4121
334	.092852	0.0	0.0	0.0	-93258.649	88267.182	4991.46675	-93258.649	88267.182	4991.46675
335	.09313	0.0	0.0	0.0	-96863.369	82885.9109	13977.4581	-96863.369	82885.9109	13977.4581
336	.093408	0.0	0.0	0.0	-99735.292	76892.9446	22842.3477	-99735.292	76892.9446	22842.3477
337	.093686	0.0	0.0	0.0	-101852.42	70333.5809	31518.8391	-101852.42	70333.5809	31518.8391
338	.093964	0.0	0.0	0.0	-103198.51	63257.4425	39941.0667	-103198.51	63257.4425	39941.0667
339	.094242	0.0	0.0	0.0	-103763.2	55718.0985	48045.0977	-103763.2	55718.0985	48045.0977
340	.09452	0.0	0.0	0.0	-103542.08	47772.6562	55769.4198	-103542.08	47772.6562	55769.4198
341	.094798	0.0	0.0	0.0	-102536.74	39481.3253	63055.4101	-102536.74	39481.3253	63055.4101
342	.095076	0.0	0.0	0.0	-100754.74	30906.959	69847.782	-100754.74	30906.959	69847.782
343	.095354	0.0	0.0	0.0	-98209.582	22114.5749	76095.0069	-98209.582	22114.5749	76095.0069
344	.095632	0.0	0.0	0.0	-94920.566	13170.8586	81749.707	-94920.566	13170.8586	81749.707
345	.09591	0.0	0.0	0.0	-90912.673	4143.65625	86769.0163	-90912.673	4143.65625	86769.0163
346	.096188	0.0	0.0	0.0	-86216.364	-4898.5436	91114.908	-86216.364	-4898.5436	91114.908
347	.096466	0.0	0.0	0.0	-80867.352	-13887.132	94754.4839	-80867.352	-13887.132	94754.4839
348	.096744	0.0	0.0	0.0	-74906.324	-22753.902	97660.2257	-74906.324	-22753.902	97660.2257
349	.097022	0.0	0.0	0.0	-68378.634	-31431.57	99810.2043	-68378.634	-31431.57	99810.2043
350	.0973	0.0	0.0	0.0	-61333.96	-39854.288	101188.248	-61333.96	-39854.288	101188.248

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p10)

```
   351    .097578          0.0          0.0          0.0   -53825.92  -47958.144  101784.064   -53825.92  -47958.144  101784.064
   352    .097856          0.0          0.0          0.0  -45911.665  -55681.654   101593.32  -45911.665  -55681.654   101593.32
   353    .098134          0.0          0.0          0.0  -37651.447  -62966.226  100617.674  -37651.447  -62966.226  100617.674
   354    .098412          0.0          0.0          0.0  -29108.155  -69756.608  98864.7633  -29108.155  -69756.608  98864.7633
   355     .09869          0.0          0.0          0.0  -20346.837  -76001.311  96348.1475  -20346.837  -76001.311  96348.1475
   356    .098968          0.0          0.0          0.0  -11434.203  -81652.999  93087.2028  -11434.203  -81652.999  93087.2028
   357    .099246          0.0          0.0          0.0  -2438.1225  -86668.854   89106.976  -2438.1225  -86668.854   89106.976
   358    .099524          0.0          0.0          0.0  6572.90237  -91010.896  84437.9931  6572.90237  -91010.896  84437.9931
   359    .099802          0.0          0.0          0.0  15530.2517  -94646.279  79116.0269  15530.2517  -94646.279  79116.0269
   360     .10008          0.0          0.0          0.0  24365.7141  -97547.538  73181.8241  24365.7141  -97547.538  73181.8241

Request for character (line printer) plotting.      |  PRINTER PLOT
Blank card terminating all plot cards.              |BLANK CARD ENDING PLOT REQUEST.
Actual List Sizes for the preceding solution follow.        05-Oct-96  10.31.18
   Size  1-10:     52     39     58      6    178     24     59      0      0      0
   Size 11-20:      0      9  -9999  -9999  -9999      0      0      0     23      0
   Size 21-29:      0      0    216      0  -9999  -9999  -9999  -9999  -9999
Seconds for overlays  1-5  :      4.341      0.000      4.341   -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays  6-11 :      0.330      0.000      0.330
Seconds for overlays 12-15 :      0.330      0.000      0.330
Seconds for time-step loop :      0.989      0.000      0.989
Seconds after DELTAT-loop  :      0.110      0.000      0.110
                             ---------------------------
                  Totals   :      6.099      0.000      6.099
```

Listagem 7.2 - Ficheiro (exemplo5.lis) com os resultados da simulação de um curto circuito trifásico simétrico numa rede real (p11)

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000006365