

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"UM AMBIENTE INTEGRADO PARA IDENTIFICAÇÃO, MODE-  
LAGEM, ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE  
ASSOCIADOS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA"

TESE SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

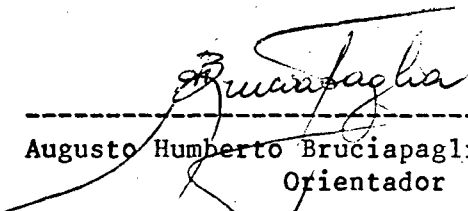
LUCAS THADEU ORIHUELA DA LUZ

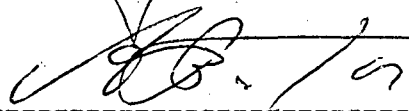
FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 1990

"UM AMBIENTE INTEGRADO PARA IDENTIFICAÇÃO, MODELAGEM, ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE ASSOCIADOS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA"

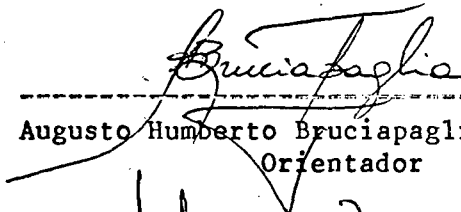
LUCAS THADEU ORIHUELA DA LUZ

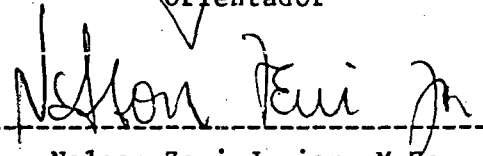
Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo curso de pós-graduação.

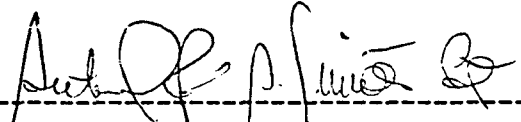
  
-----  
Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr. Ing.  
Orientador

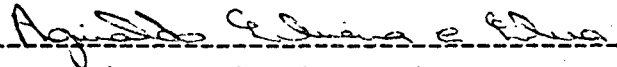
  
-----  
João Pedro Assumpção Bastos, Dr. D'Etat  
Coordenador do curso de pós-graduação  
em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

  
-----  
Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr. Ing.  
Orientador

  
-----  
Nelson Zeni Junior, M.Sc.  
Co-Orientador

  
-----  
Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

  
-----  
Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

A minha esposa, Jeanine e meus  
filhos, Jeancarlo e Marco

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Augusto Bruciapaglia, pela valiosa orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega Nelson Zeni Junior pelas brilhantes contribuições e incentivos dados.

Ao João Marcos Castro Soares pelas inúmeras "dicas" e sugestões apresentadas.

Ao apoio recebido do LCMI através do Jean Marie Fari-nes, Vânio Savi, Jorge Hermógenes, Carla Sauer, Júlio Elias Nor-mey Rico, Hêlvio José Bornhausen e Raul Schmidt.

À Companhia Estadual de Energia Elétrica representada pelas pessoas do Superintendente de Operação, Engenheiro Márcio Karam, do Diretor de Operação, Engenheiro Plínio Fonseca e do Diretor de Recursos Humanos, Engenheiro Roberto Knijnik, que propiciou o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Centro Técnico de Aperfeiçoamento e Formação (CETAF) que, nas pessoas de sua Coordenadora, Lilian Arenhart da Veiga Lima e seu Assistente, Nestor Möbus, me prestou o imprescindível apoio logístico.

Aos colegas e amigos que contribuíram através de incentivos, sugestões ou críticas.

À minha mulher e meus filhos pelos momentos de convivência que, compulsoriamente, lhes foram subtraídos.



## RESUMO

Este trabalho apresenta um ambiente integrado que foi desenvolvido para dar suporte às atividades de identificação, modelagem, análise e simulação dos sistemas de controle dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP's).

Trata-se de um programa computacional para rodar em microcomputadores IBMPC compatíveis.

O programa possui dois algoritmos para identificação de sistemas: um para identificação freqüencial e o outro para identificação temporal. Para a análise, foram implementados os algoritmos da resposta em freqüência e do lugar das raízes. Pode-se simular modelos multivariáveis e não-lineares. Um conjunto de transformações auxiliares é disponível para obter-se a equação dinâmica do modelo declarado para a simulação e para transforma-la para uma matriz de transferência.

Os menus hierárquicos utilizados para a seleção das funções do programa são apresentados e os diálogos e demais mecanismos de comunicação com o usuário são descritos.

A utilização do programa na solução de problemas de controle em SEP's é demonstrada através do projeto de um Estabilizador de Sistemas de Potência. Os resultados obtidos pelo programa são confrontados com aqueles obtidos através de ensaios de campo.

## ABSTRACT

This work presents an integrated environment which was developed to give support to the activities of identification, modeling, analysis and simulation of control systems of Electric Power Systems (EPS).

It is a computer program to be used in compatible IBMPC microcomputers.

The program has two algorithms for systems identification: one for identification in the frequency domain and other to be used in the time domain. For the analysis, were implemented the algorithms of the frequency response and the root locus. One can simulate multivariable and nonlinear models. A set of auxiliary transformations is available to obtain the dynamic equation of the model declared for the simulation and to transform it in a transfer matrix.

The hierarchical menus used for the selection of the program functions are presented and the dialogues and the others communication mechanisms with the user are described.

The program utilization in the solution of control problems in EPS's is demonstrated through the design of a Power System Stabilizer. The results obtained with the program are compared with the ones that were obtained in field tests.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
SIMBOLOGIA .....	xv
SIGLAS .....	xvi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Considerações iniciais .....	1
1.2 - Organização do trabalho .....	2
1.3 - Revisão bibliográfica .....	4
1.4 - Contribuições do trabalho .....	5
CAPÍTULO 2 - ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SISTEMA .....	7
2.1 - Introdução .....	7
2.2 - Definição do problema do controle em SEP's .....	8
2.2.1 - Identificação e modelagem .....	10
2.2.2 - Análise dos sistemas de controle .....	12
2.2.3 - Projeto de controladores .....	12
2.3 - Especificação de requisitos para um ambiente compu- tacional .....	13
2.3.1 - Identificação de sistemas físicos .....	13
2.3.1.1 - Identificação freqüencial .....	13
2.3.1.2 - Identificação temporal .....	14
2.3.2 - Análise dos sistemas de controle .....	14

2.3.2.1 - Resposta em frequência .....	15
2.3.2.2 - Lugar das raízes .....	15
2.3.3 - Simulação .....	15
2.3.3.1 - Biblioteca de blocos .....	16
2.3.3.2 - Integração numérica .....	19
2.3.3.3 - Curvas de saída .....	19
2.3.4 - Transformações auxiliares .....	19
2.3.4.1 - Obtenção da equação dinâmica ....	20
2.3.4.2 - Transformação de uma equação dinâ- mica para uma matriz de transfe- rência .....	20
2.3.5 - Projeto de controladores .....	20
2.3.6 - Interfaces com o usuário .....	21
2.3.7 - Apresentação dos relatórios .....	21
2.3.8 - Apresentação dos gráficos .....	21
2.3.9 - Estrutura de arquivos .....	22
2.3.10 - Gerenciamento do programa .....	22
2.4 - Análise estruturada do sistema proposto .....	23
2.5 - Conclusões .....	24
<b>CAPÍTULO 3 - ALGORITMOS IMPLEMENTADOS .....</b>	<b>25</b>
3.1 - Introdução .....	25
3.2 - Identificação de sistemas físicos .....	26
3.2.1 - Identificação freqüencial .....	26
3.2.2 - Identificação temporal .....	31
3.3 - Análise de sistemas lineares .....	35
3.3.1 - Resposta freqüencial .....	35
3.3.2 - Lugar das raízes .....	37
3.4 - Simulação .....	39

3.4.1 - Estrutura de dados .....	40
3.4.2 - Biblioteca de blocos .....	40
3.4.3 - Descrição topológica do modelo .....	41
3.4.4 - Descrição da natureza e dos parâmetros dos blocos .....	41
3.4.5 - Coeficientes de integração .....	42
3.4.6 - Curvas de saída .....	43
3.5 - Transformações auxiliares .....	44
3.5.1 - Obtenção da equação dinâmica .....	44
3.5.2 - Transformação de uma equação dinâmica para uma matriz de transferência .....	47
3.5.3 - Cancelamento de zeros e pólos .....	49
3.6 - Conclusões .....	50
CAPÍTULO 4 - INTERFACES PARA COMUNICAÇÃO COM O USUÁRIO ..	52
4.1 - Introdução .....	52
4.2 - "Menus" hierárquicos para seleção das funções .....	52
4.2.1 - Identificação .....	55
4.2.2 - Análise e projeto .....	55
4.2.3 - Simulação .....	55
4.2.4 - Algoritmos auxiliares .....	56
4.3 - Diálogos para entrada dos dados .....	60
4.4 - Relatórios para apresentação dos resultados .....	60
4.5 - Gráficos para apresentação dos resultados .....	61
4.6 - Mensagens para auxílio no tratamento dos erros ....	62
4.7 - Conclusões .....	62
CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	63
5.1 - Introdução .....	63

5.2 - Modelagem da máquina síncrona contra barra infinita	64
5.3 - Modelagem do sistema de excitação .....	66
5.4 - Projeto do estabilizador .....	74
5.4.1 - Requisitos operacionais e estratégia adotada	75
5.4.2 - Estrutura de estabilização .....	76
5.4.3 - Etapas do desenvolvimento do projeto .....	77
5.5 - Simulações .....	83
5.5.1 - Resposta ao degrau com variação paramétrica	83
5.5.2 - Resposta ao degrau com variação de carga ..	86
5.5.3 - Tomada de carga .....	94
5.6 - Ensaaios de campo .....	95
5.6.1 - Resposta ao degrau com variação paramétrica	95
5.6.2 - Resposta ao degrau com variação de carga ..	98
5.6.3 - Tomada de carga .....	102
5.7 - Confronto entre simulações e ensaios de campo .....	102
5.8 - Conclusões .....	103
CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	105
APÊNDICE A - DIAGRAMAS DA ANÁLISE ESTRUTURADA - SADT ....	108
APÊNDICE B - DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO FREQUENCIAL .....	121
APÊNDICE C - DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO TEMPORAL .....	126
APÊNDICE D - BIBLIOTECA DE BLOCOS PARA SIMULAÇÃO .....	130

APÊNDICE E - COEFICIENTES PARA A INTEGRAÇÃO NUMÉRICA .....	141
E.1 - Integrador .....	142
E.2 - Constante de tempo .....	142
E.3 - Avanço atraso .....	142
E.4 - Biquadrático .....	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	144
ANEXO I - LISTAGEM DO MODELO DO GERADOR CONTRA BARRA INFINITA .....	149
ANEXO II - EQUAÇÃO DE ESTADO DO GERADOR CONTRA BARRA INFINITA .....	152
ANEXO III - CARACTERÍSTICAS DE "SOFTWARE" E "HARDWARE" ..	154

## LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 5.1 - Dados do gerador e sistema de potência ....	66
TABELA 5.2 - Dados para identificação do filtro do RT ..	68
TABELA 5.3 - Dados para identificação do filtro do CCR .	70
TABELA 5.4 - Coeficientes da função de transferência Vt/Vref .....	78
TABELA 5.5 - Simulações com variação paramétrica .....	84
TABELA 5.6 - Resposta ao degrau sob diversas condições de carga .....	87
TABELA 5.7 - Resposta ao degrau com variações dos ajustes	96
TABELA 5.8 - Resposta ao degrau sob diversas condições de carga .....	98



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	- Etapas do algoritmo para cálculo do lugar das raízes .....	39
FIGURA 3.2	- Modelo do integrador .....	42
FIGURA 4.1	- Estrutura do "menu" principal .....	53
FIGURA 4.2	- "Menus" de saída .....	58
FIGURA 5.1	- Modelo do gerador contra barra infinita ...	65
FIGURA 5.2	- Modelo do sistema de excitação .....	67
FIGURA 5.3	- Resposta em frequência do filtro do RT ....	69
FIGURA 5.4	- Resposta ao degrau do filtro do CCR .....	71
FIGURA 5.5	- Modelo do gerador a vazio .....	72
FIGURA 5.6	- Lugar das raízes da função $V_t/V_{ref}$ em malha aberta .....	73
FIGURA 5.7	- Resposta ao degrau do gerador a vazio com ganho igual a 200 .....	74
FIGURA 5.8	- Modelo do ESP .....	76
FIGURA 5.9	- Resposta ao degrau dos modelos: completo e linearizado .....	79
FIGURA 5.10	- Resposta ao degrau da função $ESP/V_{ref}$ .....	80
FIGURA 5.11	- Resposta em frequência da função $V_t/V_{ref}$ ..	81
FIGURA 5.12	- Resposta em frequência da função $ESP/V_{ref}$ .	82
FIGURA 5.13	- Resposta ao degrau .....	83
FIGURA 5.14	- Resposta ao degrau .....	85
FIGURA 5.15	- Resposta ao degrau .....	85
FIGURA 5.16	- Resposta ao degrau .....	86
FIGURA 5.17	- Resposta ao degrau, $P_e=120$ MW e $Q=0$ MVAR ..	88
FIGURA 5.18	- Resposta ao degrau, $P_e=120$ MW e $Q=50$ MVAR .	89

FIGURA 5.19 - Resposta ao degrau, $P_e=120$ MW e $Q=-50$ MVAR .	90
FIGURA 5.20 - Resposta ao degrau, $P_e=75$ MW e $Q=0$ MVAR ...	91
FIGURA 5.21 - Resposta ao degrau, $P_e=75$ MW e $Q=50$ MVAR ..	92
FIGURA 5.22 - Resposta ao degrau, $P_e=75$ MW e $Q=-50$ MVAR .	93
FIGURA 5.23 - Tomada de carga - potência ativa .....	94
FIGURA 5.24 - Tomada de carga - corrente reativa .....	95
FIGURA 5.25 - Resposta ao degrau, $P_e=120$ MW e $Q=0$ MVAR ..	96
FIGURA 5.26 - Resposta ao degrau, $P_e=120$ MW e $Q=0$ MVAR ..	97
FIGURA 5.27 - Resposta ao degrau, $P_e=120$ MW e $Q=0$ MVAR ..	97
FIGURA 5.28 - Resposta ao degrau .....	99
FIGURA 5.29 - Resposta ao degrau .....	99
FIGURA 5.30 - Resposta ao degrau .....	100
FIGURA 5.31 - Resposta ao degrau .....	100
FIGURA 5.32 - Resposta ao degrau .....	101
FIGURA 5.33 - Resposta ao degrau .....	101
FIGURA 5.34 - Tomada de carga ativa .....	102
FIGURA C.1 - Curva representativa de $f(t)$ .....	128
FIGURA E.1 - Modelo do bloco integrador .....	141

## SIMBOLOGIA

- S : Potência aparente em pu ou MVA
- Pe : Potência elétrica em pu ou MW
- Q : Potência reativa em pu ou MVAR
- FP : Fator de potência
- xd : Reatância síncrona de eixo direto em pu
- x'd : Reatância transitória de eixo direto em pu
- x" d : Reatância subtransitória de eixo direto em pu
- xq : Reatância síncrona de eixo em quadratura em pu
- xl : Reatância de dispersão
- T'do : Constante de tempo transitória de circuito aberto segundo o eixo direto em s
- T"do : Constante de tempo subtransitória de circuito aberto segundo o eixo direto em s
- T"qo : Constante de tempo subtransitória de circuito aberto segundo o eixo em quadratura em s
- Ag : Parâmetro para representação da saturação em pu
- Bg : Parâmetro para representação da saturação em pu
- xe : Reatância equivalente do sistema em pu
- M : Constante de inércia em s
- D : Constante de amortecimento em pu
- Vt : Tensão terminal em pu
- Vref : Tensão de referência em pu
- $\Delta w$  : Desvio da velocidade em pu
- Efd : Tensão de campo em Volts

Outros símbolos são definidos no próprio texto.

## SIGLAS

- SEP : Sistema Elétrico de Potência
- SIMAP : Sistema de Identificação, Modelagem, Análise e Simulação de Sistemas de Controle para Sistemas de Potência
- IBMPC : International Business Machine Corporation - Personal Computer
- ESP : Estabilizador de Sistema de Potência
- CEEE : Companhia Estadual de Energia Elétrica
- LCMI : Laboratório de Controle e Microinformática
- UFSC : Universidade Federal de Santa Catarina
- D/A : Digital/Analógico
- A/D : Analógico/Digital
- SADT : Structured Analysis and Design Technique
- CCR : Compensador de Corrente Reativa
- RT : Regulador de Tensão

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - Considerações iniciais

A energia elétrica ocupa um importante papel no desenvolvimento da economia do país, devido ao elevado potencial de geração existente e a facilidade encontrada para o seu manuseio, comparada às outras formas de energia. Isto acarreta um elevado fator de participação da energia elétrica no consumo de energia nas áreas industrial, comercial e residencial.

O Brasil, por sua grande extensão territorial e por utilizar, predominantemente, fontes de geração hidráulica, que normalmente situam-se longe dos centros consumidores, possui um Sistema Elétrico de Potência (SEP) bastante complexo.

O crescimento da demanda que, nas últimas décadas, tem sustentado índices médios anuais elevados, aliado à escassez de recursos para a expansão do sistema, tem levado à operação do SEP cada vez mais próxima de seus limites. Este fato tem exigido um número cada vez maior de estudos do planejamento da operação visando manter-se a confiabilidade e a qualidade do atendimento ao consumidor. Estes estudos envolvem, principalmente, os aspectos do comportamento dinâmico do SEP. Nestes casos, assumem um papel relevante os controladores de velocidade e tensão das unidades geradoras. Este último, devido aos avanços tecnológicos da eletrônica, tem aumentado muito sua importância no comportamento dinâmico do SEP, apresentando influência crescente sobre o mesmo.

Tais fatos, têm motivado maior preocupação, das empresas do setor, no aperfeiçoamento dos seus técnicos e no desenvolvimento de ferramentas para fazer frente aos projetos e aos ajustes dos controladores, visando a operação do SEP dentro dos requisitos de confiabilidade e qualidade.

O presente trabalho insere-se neste contexto, pois, por um lado, contribui para o aperfeiçoamento dos profissionais do setor e, por outro, provê uma ferramenta útil para o suporte dos estudos citados.

O Sistema de Identificação, Modelagem, Análise e Projeto de Sistemas de Controle para Sistemas de Potência (SIMAP) é um programa computacional, desenvolvido para rodar, interativamente, em computadores IBMPC compatíveis, integrando diversas ferramentas empregadas nas atividades de identificação e modelagem de sistemas físicos e na análise e simulação de sistemas de controle.

O trabalho apresenta o problema do controle de velocidade e tensão nos SEP's, os requisitos básicos do programa, os algoritmos implementados e os resultados obtidos no desenvolvimento do projeto de um Estabilizador de Sistema de Potência (ESP). Finalmente, apresentam-se as conclusões mais relevantes sobre as várias etapas de desenvolvimento.

## 1.2 - Organização do trabalho

No capítulo 2, apresenta-se o problema do controle de velocidade e tensão nos SEP's. Descrevem-se os procedimentos utilizados para efetuar a identificação, a modelagem, a análise

e o projeto dos controladores dos SEP's e, ainda, a identificação dos geradores.

Isto posto, especificam-se os requisitos para o SIMAP dar o suporte adequado aqueles procedimentos. Esta especificação partiu da premissa que o sistema, para cumprir com os objetivos propostos, deve possuir todas as ferramentas utilizadas nas diversas etapas de um estudo, integradas em um ambiente que possua mecanismos de comunicação tais que a entrada de dados, a seleção das ferramentas e a apresentação dos resultados se dê de uma forma simples e versátil.

Apresenta-se a ferramenta utilizada para efetuar a análise do sistema especificado e a estrutura resultante desta análise.

No capítulo 3, apresentam-se os algoritmos implementados no programa. Inicialmente, apresentam-se os algoritmos de identificação freqüencial e temporal disponíveis para efetuar a identificação dos sistemas físicos. Em seguida, apresentam-se os algoritmos da resposta em freqüência e lugar das raízes, disponíveis para análise dos sistemas de controle. É, também, apresentado o algoritmo para efetuar a simulação de modelos multivariáveis e não-lineares. Finalmente, apresentam-se alguns algoritmos utilizados para efetuar algumas transformações auxiliares. Aqueles mais conhecidos são brevemente comentados enquanto os algoritmos para execução da simulação e para obtenção da equação de estado são descritos com maior profundidade.

No capítulo 4, apresentam-se as interfaces implementadas para efetuar a comunicação com o usuário. Descreve-se o sistema de "menus" para seleção das funções, o mecanismo de diálogo para entrada de dados, a apresentação dos relatórios e gráficos

com os resultados e o sistema de auxílio ao usuário, para o tratamento de erros.

No capítulo 5, apresenta-se um exemplo de utilização do SIMAP. Trata-se do projeto do ESP realizado na Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e implantado na Usina hidrelétrica de Itaúba. Descreve-se o desenvolvimento do projeto através do SIMAP, apresentam-se os resultados obtidos e comparam-se estes aos registros oscilográficos realizados nos ensaios de campo.

Finalmente, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões do trabalho. Enfatizam-se os aspectos mais relevantes do SIMAP e descrevem-se as facilidades introduzidas pelo programa nas atividades para as quais ele foi concebido.

### 1.3 - Revisão bibliográfica

Os trabalhos de Zeni Jr. [31,32] e Soares [25,26] deram importante contribuição para o detalhamento dos procedimentos inerentes as atividades de identificação, modelagem, análise e projeto de controladores para os SEP.

Referências importantes, para a especificação dos requisitos e para o projeto da estrutura do programa foram os trabalhos de Savi [22,23,24].

Este trabalho baseia-se, também, na experiência do autor que há dez anos trabalha em atividades tais como: ensaios de campo em geradores e controladores de velocidade e de tensão, análise dos dados obtidos dos ensaios visando estabelecer os modelos para representação destes equipamentos, estudos de compor-



tamento dinâmico do SEP e desenvolvimento de programas para o suporte destas atividades.

Para a elaboração do projeto utilizaram-se as técnicas de engenharia de software [15,16,18,19,20].

Os algoritmos de controle encontram-se todos na bibliografia clássica como [2,17].

O algoritmo para efetuar a identificação freqüencial é baseado no trabalho de Sanathanan [21] com uma modificação desenvolvida neste trabalho.

O algoritmo para calcular o lugar das raízes baseia-se no trabalho de Normey [14].

O procedimento implementado para executar a simulação de um modelo multivariável e não-linear contém importante contribuição de Soares [26] e Alvarado [1].

Finalmente, o pacote gráfico [27] desenvolvido no Laboratório de Controle e Microinformática (LCMI) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) foi o suporte utilizado para implementação do programa no que se refere a manuseio de gráficos e outras utilidades do sistema.

#### **1.4 - Contribuições do trabalho**

As contribuições mais significativas deste trabalho são as seguintes:

a) A introdução de uma ferramenta que, utilizando os recursos da microinformática, seja capaz de dar um suporte adequado às atividades de identificação, modelagem, análise e projeto de sistemas de controle para os SEP's.

b) Utilização de uma metodologia de engenharia de software para a especificação, o projeto e a implementação de software para a área de engenharia.

c) Introdução de algumas modificações no algoritmo para identificação freqüencial visando melhorar a inicialização do método e permitir variações na estrutura do modelo.

d) Introdução do escalamento da matriz A no algoritmo de Fadeev-Leverrier visando melhorar o seu condicionamento.

e) Aperfeiçoamento de um método para simulação de modelos multivariáveis e não-lineares com recursos para declaração e manuseio dos mesmos.

f) Aplicação, sobre o modelo utilizado para simulação, de algoritmo para montagem direta da equação de estado.

## CAPÍTULO 2

### ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SISTEMA

#### 2.1 - Introdução

Inicialmente apresentam-se os procedimentos que constituem os estudos do controle em SEP's, tais como: identificação, modelagem, análise e projeto de controladores. Descrevem-se, brevemente, os principais aspectos da identificação como a especificação, a execução de ensaios de campo e o tratamento dos dados visando a obtenção do modelo matemático dos diversos elementos do sistema. Apresentam-se, também, os métodos de análise e projeto normalmente utilizados.

Em seguida apresenta-se a especificação básica para um ambiente computacional que dê o suporte adequado aos diversos procedimentos envolvidos no problema do controle em SEP's. Esta especificação abrange os métodos de identificação, análise, simulação, transformações auxiliares, projeto e, ainda, os mecanismos de interfaces de comunicação com o usuário, apresentação de relatórios e gráficos, estrutura de arquivos e gerenciamento do programa.

Por último apresenta-se, brevemente, o método de análise utilizado e os diagramas daí resultantes, que constituem um importante elemento na documentação e no projeto do SIMAP.

## 2.2 - Definição do problema do controle em SEP's

O controle de processos envolve uma gama bastante grande e diversificada de problemas a resolver. A complexidade destes varia de acordo com a natureza do processo e com as funções de controle que se queira implementar. Os processos podem ser lineares ou não-lineares, monovariáveis ou multivariáveis, contínuos ou discretos e invariantes ou variáveis no tempo. Para cada uma destas características ter-se-á uma lei de controle que se mostrará mais adequada e eficiente para atender aos requisitos estabelecidos.

Existe um vasto conjunto de metodologias, algoritmos, técnicas e ferramentas para o tratamento dos problemas citados anteriormente. A escolha do procedimento mais adequado dependerá da natureza do processo, do ambiente em que este se encontra e do tipo de controle que será imposto ao mesmo.

Alguns programas que tratam problemas específicos do controle em sistemas de potência foram desenvolvidos nas empresas do setor elétrico. No entanto, nunca houve a preocupação com a divulgação e, principalmente, com os ambientes de hardware nos quais foram desenvolvidos. Desta forma, tais programas mostram-se pouco adequados para o uso generalizado das empresas.

Assim posto, pode-se concluir que um programa orientado aos problemas, desenvolvido para um hardware bastante popular como o do IBMPC e que integre as diversas funções, torna-se mais útil e eficiente.

Quando se analisa os sistemas de controle de uma usina, o processo, que é uma máquina síncrona ligada a uma rede elétrica, não varia quanto a sua natureza. As diferenças exis-

tentes referem-se à fonte primária de energia, que pode ser de origem hidráulica ou térmica, ao tipo do gerador e às características da rede elétrica. A máquina é representada por modelos padrões, como os modelos I, II, III e IV [30], com topologia fixa, que diferem apenas quanto ao grau de complexidade da representação.

A escolha do modelo para um determinado estudo dependerá do tipo de gerador, natureza do estudo e da precisão desejada nos resultados.

Os geradores síncronos, utilizados no sistema de potência, necessitam, basicamente, de um controlador de velocidade e um controlador de tensão que devem cumprir as seguintes funções:

a - Controladores de velocidade [25]

- Prover rapidez na partida e na sincronização da unidade geradora;

- Manter a frequência do sistema a mais próxima possível da frequência de referência;

- Compensar as variações aleatórias de carga do sistema;

b - Controladores de tensão [32]

- Manter a tensão terminal da máquina dentro de limites aceitáveis, mesmo na ocorrência de distúrbios severos no sistema de potência;

- Manter o perfil de tensão do sistema de acordo com o que foi programado pela operação;

- Prover torques de amortecimento para as oscilações do sistema;

- Limitar dinamicamente a operação da máquina dentro de regiões estáveis;

A operação adequada do SEP somente será obtida com controladores que possuam as funções específicas para este fim e encontrem-se corretamente ajustados.

O ajuste adequado dos controladores é efetuado a partir dos seguintes elementos:

- modelos e parâmetros do processo;
- modelos e parâmetros dos controladores;
- metodologia adequada a esta finalidade;
- ferramentas que suportem a metodologia adotada;

A seguir são apresentadas as funções básicas presentes nos estudos de comportamento dinâmico do SEP no que se refere aos controladores.

### 2.2.1 - Identificação e modelagem

A elaboração dos estudos do comportamento dinâmico dos SEP's exige modelos matemáticos que representem adequadamente os diversos elementos envolvidos no sistema. Os principais elementos representados nos estudos são: linhas de transmissão, transformadores, cargas, geradores e controladores de velocidade e tensão.

A maior influência na dinâmica do SEP deve-se à ação dos geradores, das cargas e dos controladores de tensão e velocidade [4,5,6,7,8]. Portanto, deve-se a isto, a maior preocupação com a modelagem destes elementos.

Os geradores são usualmente representados pelo modelo IV. Portanto, a identificação dos geradores envolve, somente, a obtenção dos parâmetros da máquina.

Já os controladores apresentam estruturas distintas e, portanto, seus modelos necessitam ser identificados caso a caso.

A obtenção destes modelos envolve as seguintes etapas:

- Verificação da topologia dos controladores a partir dos documentos fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos ou levantamentos preliminares de campo;

- Análise da natureza provável de cada bloco da topologia visando definir ensaios de campo específicos para sua identificação;

- Especificação dos ensaios de campo para identificação dos controladores;

- Especificação dos ensaios de campo para levantamento dos parâmetros do gerador, geralmente visando atender ao modelo mais detalhado [32];

- Execução dos ensaios especificados;

- Análise dos dados obtidos nos ensaios com a finalidade de obter os modelos adequados à representação do sistema em questão;

- Validação dos modelos obtidos podendo retornar a qualquer um dos itens anteriores;

Dois tipos de ensaios são usualmente utilizados para efetuar a identificação dos controladores, o ensaio de resposta em frequência e o ensaio de resposta ao degrau.

A validação dos modelos é efetuada através do confronto entre a resposta do modelo a um determinado ensaio e o

ensaio real, refinando-se o modelo até que a resposta obtida seja satisfatória.

Neste trabalho objetiva-se desenvolver ferramentas apropriadas ao tratamento dos dados envolvidos nos dois últimos itens do roteiro apresentado.

### 2.2.2 - Análise dos sistemas de controle

Esta fase desenvolve-se a partir da obtenção dos modelos para representação do sistema em estudo e compreende a verificação do desempenho dos sistemas sob as diversas condições de operação a que os mesmos serão submetidos.

Este procedimento deverá ser suportado pelo programa através de um conjunto de ferramentas clássicas de análise, simulação de modelos multivariáveis e não-lineares e algoritmos de transformação de modelos (variáveis de estado para função de transferência, modelo em diagrama de blocos para equação de estado, etc).

### 2.2.3 - Projeto de controladores

O projeto de controladores para os SEP's desenvolve-se, basicamente, a partir dos métodos clássicos. Esta metodologia consiste em estabelecer-se uma estrutura inicial para o controlador e proceder-se seu ajuste a partir das informações obtidas com as ferramentas clássicas de análise.

Posteriormente, analisa-se o sistema projetado e, se for o caso, retorna-se ao ajuste do controlador, interagindo, desta forma, até obter-se o desempenho adequado.



## **2.3 - Especificação de requisitos para um ambiente computacional**

Desenvolve-se a especificação básica [13,16,29] para o projeto a partir da definição do problema do controle em SEP's apresentada no item 2.2.

Especifica-se a natureza dos dados fornecidos ao programa, o tratamento necessário a cada função, a forma de apresentação dos relatórios, os meios de comunicação com o usuário e o sistema de armazenamento dos dados [22].

### **2.3.1 - Identificação de sistemas físicos**

Esta função deve dispor de algoritmos que efetuem o tratamento dos dados obtidos nos ensaios de resposta em frequência e resposta ao degrau presentes no procedimento de identificação apresentado no item 2.2.1. O algoritmo escolhido deverá calcular a função de transferência mais adequada para representar o sistema objeto do ensaio. O usuário poderá propor a estrutura do modelo e, interativamente, modificá-la até obter aquela que proporcione um ajuste satisfatório.

#### **2.3.1.1 - Identificação freqüencial**

Os dados obtidos através dos ensaios de resposta em frequência são os seguintes: frequência em Hz, ganho em pu/pu e ângulo de fase em graus. O tratamento destes dados consiste em obter-se a função de transferência que melhor se ajuste ao conjunto de pontos fornecido.

### 2.3.1.2 - Identificação temporal

Os dados obtidos nos ensaios de resposta ao degrau são os seguintes: tempo em segundos e amplitude em pu. O tratamento destes dados consiste em obter-se a função de transferência que melhor se ajuste ao conjunto de pontos fornecido.

### 2.3.2 - Análise dos sistemas de controle

Os requisitos de desempenho dos sistemas de controle, no domínio do tempo, são especificados através das características de sobrelevação, tempo de subida, tempo de atraso, tempo de acomodação e erro de regime. Entretanto, existe uma correlação bastante forte entre estas grandezas e as grandezas características do domínio da frequência tais como a margem de ganho e a margem de fase.

Na análise e no projeto de controladores dos SEP's utilizam-se largamente as técnicas do domínio da frequência porque existem muitos métodos disponíveis para tanto, além destas, usa-se, também, o lugar das raízes e a simulação.

O programa deverá dispor de algoritmos que efetuem a resposta em frequência e o lugar das raízes para sistemas lineares e a simulação de modelos multivariáveis e não-lineares.

O projeto de sistemas de controle, quando utiliza-se um método clássico, é efetuado de forma interativa. Inicialmente, efetua-se a análise do processo visando estabelecer o tipo de projeto necessário. Em seguida, desenvolve-se o projeto a partir da técnica escolhida. Por último, efetua-se a validação do projeto através de um método de análise.

### 2.3.2.1 - Resposta em frequência

Esta função consiste em um algoritmo que efetue o cálculo do módulo, fase, parte real e parte imaginária de uma função de transferência em uma faixa de frequências especificada. Estes dados devem ser apresentados sob a forma de gráficos: diagrama de Bode, diagrama de Nichols e diagrama de Nyquist [2,17].

Deve-se permitir que o usuário selecione o diagrama que será apresentado.

O sistema deverá dispor de um "buffer" para o armazenamento das curvas de resposta em frequência e permitir as suas apresentações simultaneamente.

### 2.3.2.2 - Lugar das raízes

Esta função consiste em um algoritmo para apresentar o gráfico do lugar das raízes de uma equação característica quando varia-se um parâmetro. São fornecidos os graus e os coeficientes dos polinômios do numerador e do denominador da função de transferência de malha aberta. O algoritmo deverá adotar o ganho como sendo o parâmetro variável.

### 2.3.3 - Simulação

Deve-se implementar um algoritmo capaz de simular modelos multivariáveis e não-lineares. O modelo deve ser declarado através de sua topologia, da natureza dos blocos e de seus parâmetros. A topologia descreve a relação entre os blocos do modelo. A natureza caracteriza a função executada por cada bloco.

Os parâmetros dos blocos definem a relação saída/entrada de cada bloco especificamente.

Deve-se dispor de uma biblioteca com um conjunto básico de blocos que permita a representação de todos os modelos utilizados nos estudos referentes aos sistemas de controles dos SEP's.

O algoritmo deve executar a simulação a partir de uma determinada condição inicial que será estabelecida pelo usuário.

#### 2.3.3.1 - Biblioteca de blocos

A biblioteca deve apresentar os seguintes blocos:

- Tempo : bloco sem entrada que coloca na saída o valor do tempo de simulação.
- Constante : bloco sem entrada que coloca na saída um valor constante.
- Entrada A/D : bloco com uma entrada proveniente de um conversor analógico/digital que coloca na saída o valor resultante desta conversão.
- Integrador : bloco com três entradas que calcula a saída como uma função integral da soma algébrica das entradas.
- Integrador limitado : bloco com três entradas que calcula a saída como uma função integral limitada da soma algébrica das entradas.
- Constante de tempo : bloco com três entradas que calcula a saída como uma função integral realimentada da soma algébrica das entradas.
- Biquadrático : bloco com três entradas que calcula a saída como uma biquadrática da soma algébrica das entradas.

- Atraso : bloco com três entradas que calcula a saída como sendo a entrada com o atraso de um passo de simulação.
- Derivada : bloco de três entradas que calcula a saída como sendo a derivada da soma algébrica das entradas.
- Limitador : bloco com três entradas que calcula a saída como uma função linear limitada da soma algébrica das entradas.
- Zona morta : bloco com três entradas que calcula a saída como uma função linear da soma algébrica das entradas com uma zona morta.
- Relé : bloco com três entradas que assume a saída como sendo igual a um entre dois valores, dependendo se a soma algébrica das entradas for positiva ou negativa.
- Histerese : bloco com três entradas que assume a saída como sendo uma função de histerese da soma algébrica das entradas.
- Somador : bloco com três entradas ponderadas que calcula a soma destas acrescidas de um valor de "off-set".
- Multiplicador : bloco com duas entradas que calcula o produto destas ponderado com um ganho.
- Divisor : bloco com duas entradas que efetua a divisão da entrada um pela entrada dois.
- Raiz quadrada : bloco com três entradas que calcula a raiz quadrada da soma algébrica destas.
- Exponencial : bloco com três entradas que calcula a exponencial da soma algébrica destas.
- Seno : bloco com três entradas que calcula o seno da soma algébrica destas.

- Tabela : bloco com três entradas que calcula a saída como uma função tabelada da soma algébrica das entradas.
- Polinômio : bloco com três entradas que calcula a saída com uma função polinomial da soma algébrica das entradas.
- Ganho : bloco com três entradas que calcula a saída como sendo a soma algébrica das entradas vezes um ganho.
- Ganho controlado : bloco com duas entradas que calcula a saída como uma função da entrada um vezes um ganho, que pode assumir dois valores diferentes, dependendo do valor da entrada dois.
- Chaveamento : bloco com três entradas que assume a saída igual a entrada dois ou três dependendo do valor da entrada um.
- Relé temporizado : bloco com três entradas que calcula a saída através da soma algébrica das entradas ou zero, se a saída ultrapassar determinado valor durante um tempo especificado.
- Conversor D/A : bloco com três entradas que coloca a soma algébrica das entradas em uma porta de saída através de um conversor Digital/Analógico.
- Mínimo : bloco com três entradas ponderadas que assume a saída como sendo o menor valor ponderado.
- Máximo : bloco com três entradas ponderadas que assume a saída como sendo o maior valor ponderado.
- Módulo : bloco com três entradas que calcula a saída como sendo a raiz quadrada da soma dos quadrados das entradas multiplicados por uma ponderação.

### 2.3.3.2 - Integração numérica

A integração deverá basear-se em um método de segunda ordem, com coeficientes ajustáveis pelo usuário, que apresente precisão e boa estabilidade numérica [1].

O passo de integração e o tempo de simulação serão fornecidos pelo usuário.

O usuário definirá as condições iniciais para a simulação entre as seguintes opções: entrar novos valores, assumir valores nulos ou assumir valores existentes na saída.

### 2.3.3.3 - Curvas de saída

O programa deverá monitorar, durante a simulação, a saída de diversos blocos do modelo para apresentar, na tela, as curvas resultantes.

### 2.3.4 - Transformações auxiliares

Considerando-se que os modelos utilizados nos SEP's possuem estruturas complexas e que o programa integrará diversos algoritmos, percebe-se a necessidade de ferramentas que efetuem algumas transformações destes modelos. Deverão ser implementados algoritmos que efetuem as seguintes funções: cálculo de zeros e pólos de função de transferência, produto de polinômios, cancelamento de zeros e pólos e reconstituição de polinômios a partir de suas raízes.

#### 2.3.4.1 - Obtenção da equação dinâmica

Deve-se implementar um algoritmo que calcule os coeficientes das matrizes A, B, C e D, que representam o modelo incremental, através da sua equação dinâmica, em torno de uma condição de operação, de um determinado modelo multivariável e não-linear.

#### 2.3.4.2 - Transformação de uma equação dinâmica para uma matriz de transferência

Deve-se implementar um algoritmo que efetue a transformação de um modelo incremental, representado por sua equação dinâmica, para a matriz de transferência correspondente. Esta transformação é necessária para permitir que se utilizem os algoritmos de resposta em frequência, lugar das raízes, cálculo de zeros e pólos, etc.

#### 2.3.5 - Projeto de controladores

A metodologia de projeto largamente empregada no controle dos SEP's é baseada nas ferramentas clássicas como resposta em frequência, lugar das raízes e simulação digital. Assim sendo o procedimento de projeto envolve uma seqüência interativa entre as etapas de análise do sistema, proposta de uma estrutura de controle, ajuste do controlador e retorno à análise para validação do projeto.

O suporte necessário a este procedimento constitui-se em um ambiente integrado, com as diversas ferramentas utilizadas, aliado a um mecanismo de comunicação com o usuário bastante



versátil, de forma a proporcionar-lhe um instrumento eficaz no apoio ao projeto.

### **2.3.6 - Interfaces com o usuário**

Devem-se prover mecanismos que cumpram as seguintes funções: seleção dos algoritmos, apresentação e controle dos diálogos para a entrada dos dados e a apresentação dos relatórios e gráficos [22].

Os mecanismos de comunicação do programa com o usuário devem proporcionar uma utilização eficiente dos diversos recursos integrados no sistema. Este aspecto é muito importante para que se desenvolvam os projetos de acordo com os procedimentos apresentados no item 2.2.3.

### **2.3.7 - Apresentação dos relatórios**

O programa deve apresentar, na tela do computador, um relatório com os resultados encontrados. Estes relatórios, por decisão do usuário, poderão, também, ser emitidos através da impressora.

Após a apresentação dos relatórios o usuário poderá salvar, em arquivos, os resultados obtidos ou os dados de entrada que lhes deram origem.

### **2.3.8 - Apresentação dos gráficos**

Alguns algoritmos apresentam seus resultados sob a forma gráfica como a resposta em frequência, o lugar das raízes e a simulação. O programa deve possuir rotinas para apresentação

destes gráficos na tela do computador. Devem ser implementadas, também, rotinas para o manuseio destes gráficos. Para isto, deve-se dispor de rotinas que efetuem as seguintes funções: leitura dos pontos dos gráficos, ampliação de trechos dos gráficos, edição de legendas com o propósito de documentação e ampliação de janelas gráficas.

Após a apresentação dos gráficos o usuário poderá salvar, em arquivos, os resultados obtidos ou os dados de entrada que lhes deram origem.

#### **2.3.9 - Estruturas de arquivos**

Os dados de entrada para os algoritmos poderão ser digitados diretamente pelo usuário ou lidos de arquivos.

Os dados de entrada para os algoritmos e os resultados apresentados pelo programa poderão, por decisão do usuário, ser armazenados em arquivos.

#### **2.3.10 - Gerenciamento do programa**

O programa deve possuir um sistema de gerenciamento capaz de efetuar, de maneira eficiente, o controle das diversas funções implementadas. O gerenciador é a rotina que responderá pelo sincronismo na execução de uma função do programa. Para executar-se uma função, precisa-se observar a seguinte seqüência: entrada de dados, execução do algoritmo e a apresentação do relatório dos resultados.

O programa deve gerenciar a base de dados de forma que suas estruturas sejam alocadas e desalocadas dinamicamente, na

memória, sempre que um determinado algoritmo for ativado e desativado, respectivamente.

#### 2.4 - Análise estruturada do sistema proposto

A partir da definição do problema de controle em SEP's e da especificação de requisitos para um ambiente computacional, apresentados nos itens 2.2 e 2.3 respectivamente, desenvolveu-se a análise estruturada do sistema proposto, visando estabelecer a estrutura para o programa.

Esta análise foi desenvolvida utilizando-se a "Structured Analysis and Design Technique" (SADT) [19], que é uma técnica desenvolvida por Douglas T. Ross apresentada no artigo "Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas" [20]. Esta opção deve-se, em parte, à característica do sistema que se quer analisar, que possui pequeno volume de dados de entrada, vários algoritmos para tratamento destes dados e pequeno volume dos relatórios de saída. Considerou-se, também, o fato desta ferramenta de análise possuir regras bem definidas para sua utilização e dar, como resultado, um conjunto de diagramas que apresenta claramente a estrutura do sistema e as relações entre as diversas funções do mesmo.

A SADT consiste, basicamente, em representar-se o problema através de diagramas estruturados seguindo um determinado conjunto de regras. Estes diagramas apresentam, para cada bloco, as informações de entrada e saída, os mecanismos de controle e os recursos utilizados. O sistema é detalhado através da exploração dos diagramas até que todas as funções estejam representadas

por blocos suficientemente simples de tal forma que sua transformação em código de programa seja efetuada de maneira trivial.

Os diagramas obtidos desta análise são apresentados no apêndice A.

## 2.5 - Conclusões

Inicialmente, apresentou-se a definição do problema de controle em SEP's, onde descreveram-se os procedimentos adotados para a identificação dos modelos utilizados, para a análise do comportamento e, também, para os projetos de controladores destes sistemas.

A seguir, descreveu-se um conjunto de requisitos necessários a um ambiente computacional, que dá o suporte adequado às atividades envolvidas nos estudos de comportamento dos sistemas de controles dos SEP's.

Finalmente, apresentou-se a análise estruturada do sistema proposto onde descreveu-se, brevemente, o método utilizado e os diagramas resultantes desta análise.

## CAPÍTULO 3

### ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

#### 3.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados os algoritmos que foram implementados no programa. Descreve-se cada algoritmo mostrando-se os principais aspectos de sua implementação.

Inicialmente, descrevem-se os dois algoritmos para identificação sendo um para efetuar o tratamento dos dados obtidos nos ensaios de resposta em frequência e o outro para os dados obtidos nos ensaios de resposta no tempo.

Em seguida, descrevem-se os dois algoritmos para a análise sendo um para efetuar a resposta em frequência e o outro para efetuar o lugar das raízes.

Descreve-se, também, o algoritmo implementado para efetuar a simulação de modelos multivariáveis e não-lineares. Apresenta-se a estrutura utilizada para descrever a topologia do modelo, a biblioteca dos blocos implementados, o método de integração empregado e o sistema de monitoração das variáveis para apresentação das curvas resultantes.

Finalmente, descrevem-se alguns algoritmos que efetuam transformações e operações auxiliares como obtenção das matrizes do modelo incremental, da matriz de transferência de uma equação dinâmica, dos zeros e pólos de uma função de transferência, produto de polinômios, etc.

### 3.2 - Identificação de sistemas físicos

De acordo com a especificação de requisitos do sistema, implementaram-se dois algoritmos para o suporte dos procedimentos de identificação e modelagem.

Implementou-se o algoritmo de identificação frequencial para efetuar o tratamento dos dados obtidos através dos ensaios de resposta em frequência.

Implementou-se, também, o algoritmo para efetuar a correlação do domínio do tempo para o domínio da frequência que combinado com o algoritmo de identificação frequencial permite tratar os dados obtidos através dos ensaios de resposta no tempo.

#### 3.2.1 - Identificação frequencial

O método de identificação frequencial consiste no tratamento dos dados, obtidos através dos ensaios de resposta em frequência, visando obter-se os coeficientes da função de transferência que melhor representa o sistema físico.

Com este propósito, tem-se utilizado, há bastante tempo, na CEEE, o método de Levy que apresenta bons resultados. Com base nisto, implementou-se este algoritmo acrescido de algumas modificações que são comentadas ao longo de sua apresentação. A primeira delas foi proposta por Sanathanan [21] e consiste na introdução de um laço iterativo para efetuar o refinamento dos coeficientes usando, para este propósito, os resultados obtidos no passo anterior.

O algoritmo consiste em obter-se os coeficientes da expressão (3.1) através da minimização do erro quadrático entre a função de transferência procurada e os dados fornecidos.

$$G(jw) = \frac{b_0 + b_1 (jw) + \dots + b_m (jw)^m}{a_0 + a_1 (jw) + \dots + a_n (jw)^n} \quad (3.1)$$

$$n \geq m$$

Sendo  $F(jw_k)$  o valor obtido por ensaio para uma determinada frequência  $w_k$  e considerando (3.2), (3.3) e (3.4), obtém-se a expressão (3.5) para representar o erro de ajuste existente neste ponto.

$$P(jw) = b_0 + b_1 (jw) + \dots + b_m (jw)^m \quad (3.2)$$

$$Q(jw) = a_0 + a_1 (jw) + \dots + a_n (jw)^n \quad (3.3)$$

$$G(jw) = \frac{P(jw)}{Q(jw)} \quad (3.4)$$

$$E_k = F(jw_k) - \frac{P(jw_k)}{Q(jw_k)} \quad (3.5)$$

Para viabilizar a minimização do erro é necessário multiplicar (3.5) por  $Q(jw_k)$  obtendo-se, desta maneira, a expressão (3.6) que representa o erro ponderado.

$$E'_k = F(jw_k) * Q(jw_k) - P(jw_k) \quad (3.6)$$

O somatório do erro quadrático ponderado fica:

$$E = \sum_{k=1}^n [F(jw_k) * Q(jw_k) - P(jw_k)]^2 \quad (3.7)$$

Lembrando-se de (3.2) e (3.3), a minimização de (3.7) é obtida derivando-se E, parcialmente, em relação aos coeficientes  $b_i$  e  $a_i$  respectivamente. Desta maneira obtém-se o seguinte sistema linear:

$$[A] [X] = [B] \quad (3.8)$$

cuja solução apresenta as seguintes dificuldades:

a - Se a faixa de frequências utilizada nos ensaios abrange diversas décadas, os elementos de [A] são tais que os valores correspondentes às baixas frequências têm pouca influência. Conseqüentemente não se consegue bom ajuste nas baixas frequências.

b - Se os pólos de  $G(s)$  são tais que  $[Q(jw)]^2$  varia muito para os pontos obtidos no ensaio, grandes erros são introduzidos.

Para contornar os problemas anteriormente arrolados, foram implementadas duas modificações no algoritmo. A primeira delas, proposta por Sanathanan, consiste na divisão da expressão (3.6) pelo módulo do denominador calculado com os coeficientes do passo anterior. A expressão para o erro quadrático torna-se:

$$[E'_k]^2 = \frac{[F(jw_k) * Q(jw_k)_i - P(jw_k)_i]^2}{|Q(jw_k)_{i-1}|^2} \quad (3.9)$$

O subscrito 'i' em (3.9) significa o número da iteração. Sanathanan sugere a utilização de  $|Q(jw_k)_0|$  igual a 1 no passo zero. Porém, desenvolveu-se um procedimento de iniciali-



zação visando melhorar a aproximação inicial dos coeficientes. Tal procedimento, consiste em inicializar  $|Q(jw_k)_0|$  de acordo com a expressão (3.10). Esta modificação resultou em um desempenho superior do algoritmo proporcionando resultados bastante satisfatórios.

$$|Q(jw_k)_0| = \frac{1}{(1 + w_k^2 / w1 * w2)^n} \quad (3.10)$$

onde:

w1 - valor da menor frequência utilizada na identificação

w2 - valor da maior frequência utilizada na identificação

n - grau do polinômio do denominador da função de transferência

Em suma, parte-se do princípio que o denominador da função de transferência pode ser inicialmente aproximado por um simples pólo com uma multiplicidade igual ao grau do denominador original. Este pólo é fixado na média geométrica da menor e maior frequência utilizada no ensaio, baseando-se no fato de que é um procedimento de bom senso que a faixa de frequências de estímulo contenha todas as singularidades da função de transferência.

O cálculo dos coeficientes passa a ser efetuado pela minimização de:

$$E = \sum_{k=1}^n \frac{[E'_k]^2}{|Q(jw_k)_{i-1}|^2} \quad (3.11)$$

Igualando-se a zero as derivadas assim obtidas, chega-se ao sistema linear:

$$\begin{bmatrix}
 L_0 & 0 & -L_2 & 0 & \dots & -S_0 & T_1 & S_2 & -T_3 & \dots \\
 0 & L_2 & 0 & -L_4 & \dots & -T_1 & -S_2 & T_3 & S_4 & \dots \\
 -L_2 & 0 & L_4 & 0 & \dots & S_2 & -T_3 & -S_4 & T_5 & \dots \\
 0 & -L_4 & 0 & L_6 & \dots & T_3 & S_4 & -T_5 & -S_6 & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 -S_0 & -T_1 & S_2 & T_3 & \dots & U_0 & 0 & -U_2 & 0 & \dots \\
 T_1 & -S_2 & -T_3 & S_4 & \dots & 0 & U_2 & 0 & -U_4 & \dots \\
 S_2 & T_3 & -S_4 & -T_5 & \dots & -U_2 & 0 & U_4 & 0 & \dots \\
 -T_3 & S_4 & T_5 & -S_6 & \dots & 0 & -U_4 & 0 & U_6 & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 b_0 \\
 b_1 \\
 b_2 \\
 b_3 \\
 \dots \\
 a_0 \\
 a_1 \\
 a_2 \\
 a_3 \\
 \dots
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \dots \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \dots
 \end{bmatrix}
 \quad (3.11)$$

onde:

$$L_h = \sum_{k=1}^n w_k^h$$

$$S_h = \sum_{k=1}^n w_k^h * R_k \quad (3.12)$$

$$T_h = \sum_{k=1}^n w_k^h * I_k$$

$$U_h = \sum_{k=1}^n w_k^h * (R_k^2 + I_k^2)$$

$$h = 0, 1, 2, \dots$$

A solução de (3.11) exige que uma das variáveis seja fixada. Geralmente faz-se  $a_0$  igual a 1 [21]. Porém, implementou-

se o algoritmo de forma que o usuário possa definir, entre os coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ , aquele que será fixado igual a 1. Após esta definição será eliminada a linha correspondente em (3.11) e a coluna respectiva será colocada no vetor B em (3.8). A solução deste sistema é obtida através de rotina específica para solução de sistemas lineares [12].

Este algoritmo converge rapidamente (entre 3 e 5 iterações) e apresentou bons resultados nos testes realizados com dados obtidos de ensaios de campo, mesmo quando estes dados continham imprecisão devido a leitura dos oscilogramas.

O algoritmo calcula os coeficientes da função de transferência cuja estrutura é definida pelo usuário através do grau do numerador e do denominador. Esta estrutura poderá ser alterada visando-se encontrar aquela que melhor represente o sistema identificado.

### 3.2.2 - Identificação temporal

O método implementado para efetuar a identificação de sistemas, a partir dos dados obtidos através de ensaios de resposta no tempo, constitui-se, numa primeira etapa, num procedimento para efetuar a correlação dos pontos do domínio do tempo para o domínio da frequência [2] e, posteriormente, utiliza-se o procedimento para identificação freqüencial.

Esta opção deve-se a uma série de razões. O algoritmo que efetua a correlação do domínio do tempo para o domínio da frequência apresenta bons resultados e é facilmente implementado. Obtém-se a derivada da função correlacionada de uma maneira que evitam-se os problemas numéricos inerentes a esta ope-

ração. Esta derivação é necessária porque na maioria dos ensaios utilizados para identificação temporal emprega-se a resposta ao degrau e, por conseguinte, os dados obtidos representam a função procurada multiplicada pela função que representa o degrau aplicado. Para a segunda etapa do método, utiliza-se a identificação freqüencial já implementada.

Para efetuar a correlação do domínio do tempo para o domínio da freqüência utiliza-se o par de transformadas de Fourier, (3.13) e (3.14), que expressa exatamente a relação entre estes dois domínios.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} [g(w) e^{j\omega t}] dw \quad (3.13)$$

$$g(w) = \int_{-\alpha}^{\alpha} [f(t) e^{-j\omega t}] dt \quad (3.14)$$

Quando tem-se  $f(t)$  na forma analítica basta resolver (3.14) para obter-se  $g(w)$ . Porém, isto não ocorre nos problemas de identificação. Nestes casos tem-se  $f(t)$  sob a forma de uma tabela de pontos.

A obtenção de  $g(w)$ , para determinado número de pontos, em uma dada faixa de freqüência, requer que se efetue a transformada de Fourier (3.14) de cada ponto da tabela para todos os valores definidos para  $w$ . Esta transformação é efetuada a partir das seguintes expressões:

$$g(w) = g_r + j g_i \quad (3.15)$$

onde  $g_r$  (3.16) e  $g_i$  (3.17) representam a parte real e imaginária de  $g(w)$  respectivamente e são obtidas como segue.

$$g_r(w) = \sum_{n=0}^k \frac{(A_{n+1} - A_n)}{(t_{n+1} - t_n)} \frac{1}{(-w^2)} (\cos wt_n - \cos wt_{n+1}) \quad (3.16)$$

$$g_i(w) = -\frac{A_0}{w} - \sum_{n=0}^k \frac{(A_{n+1} - A_n)}{(t_{n+1} - t_n)} \frac{1}{(-w^2)} (\sen wt_n - \sen wt_{n+1}) \quad (3.17)$$

Demonstram-se as expressões (3.16) e (3.17) no apêndice C.

O algoritmo implementado efetua o tratamento dos dados obtidos a partir da resposta no tempo ao impulso, degrau ou rampa. A expressão (3.15) representa a transformada de Fourier da resposta ao estímulo aplicado e pode ser escrita como:

$$g(jw) = f(jw) u(jw) \quad (3.18)$$

onde:

$f(jw)$  : função procurada

$u(jw)$  : estímulo aplicado

Considerando (3.15) e (3.18), dependendo do estímulo aplicado, obtêm-se a função desejada através das seguintes transformações auxiliares:

a - Resposta ao impulso

$$f(jw) = g_r + j g_i \quad (3.19)$$

b - Resposta ao degrau

$$g(jw) = \frac{A}{jw} \quad f(jw) = g_r + j g_i \quad (3.20)$$

$$f(jw) = (g_r + j g_i) \frac{jw}{A} \quad (3.21)$$

$$f(jw) = - \frac{w}{A} g_i + j \frac{w}{A} g_r \quad (3.22)$$

c - Resposta à rampa

$$g(jw) = - \frac{A}{w^2} \quad f(jw) = g_r + j g_i \quad (3.23)$$

$$f(jw) = - \frac{w^2}{A} (g_r + j g_i) \quad (3.24)$$

$$f(jw) = - \frac{w^2}{A} g_r - j \frac{w^2}{A} g_i \quad (3.25)$$

As expressões (3.16) e (3.17) permitem que se efetue a transformação, do domínio do tempo para o domínio da frequência, do conjunto de pontos obtidos do ensaio, isto é, a resposta do sistema ao estímulo aplicado. O resultado assim obtido pode ser transformado na resposta em frequência do sistema identificado através das expressões (3.19), (3.22) ou (3.25), dependendo do estímulo aplicado.

Finalmente, tem-se os dados necessários para executar o procedimento de identificação freqüencial e obter-se a função de transferência desejada.

### 3.3 - Análise de sistemas lineares

As ferramentas mais utilizadas para análise de sistemas lineares são a resposta freqüencial e o lugar das raízes [17].

A resposta em freqüência é bastante utilizada devido a simplicidade de implementação do método e a interpretação direta dos resultados.

O lugar das raízes é um método cujo algoritmo apresenta alguma complexidade de implementação porém fornece grande quantidade de informações a respeito do sistema que se deseja analisar.

#### 3.3.1 - Resposta freqüencial

Para executar a resposta em freqüência de uma função de transferência como (3.1) implementou-se um algoritmo que calcula os valores do módulo e da fase, para um determinado valor de freqüência, a partir da contribuição de cada um dos seus pólos e zeros.

Fatorando-se, o numerador e o denominador de (3.1), obtém-se termos do tipo:

$$\begin{aligned} a &: K \\ b &: j\omega \\ c &: 1 + j\omega T \end{aligned}$$

$$d : 1 + (2/w_n)jw + (jw)^2/w_n^2$$

cujos módulos podem ser calculados, para um determinado valor da frequência, através das expressões:

$$a : K$$

$$b : w$$

$$c : \sqrt{1 + w^2T^2}$$

$$d : \sqrt{(1 - w^2/w_n^2) + (2w/w_n)^2}$$

e os ângulos podem ser calculados, para um determinado valor da frequência, através de:

$$a : 0^\circ$$

$$b : 90^\circ$$

$$c : \text{arctg}(wT)$$

$$d : \text{arctg} \left[ \frac{(2w/w_n)}{(1 - w^2/w_n^2)} \right]$$

O módulo da função de transferência para um determinado valor da frequência é obtido multiplicando-se todos módulos relativos a cada zero da função e dividindo-se o resultado, pelos módulos relativos a cada um de seus pólos.

A fase da função de transferência, para cada valor da frequência, é obtida somando-se a fase de todos os zeros da função e subtraindo-se a fase de todos os seus pólos.



### 3.3.2 - Lugar das raízes

O método do lugar das raízes é uma das ferramentas clássicas mais importantes para a análise e o projeto de sistemas de controle. Existem, fundamentalmente, dois tipos de algoritmos para obtenção do lugar das raízes: os que calculam as raízes da equação para cada valor do ganho e aqueles que obtêm os pontos de cada ramo do gráfico, de maneira contínua, sem resolver explicitamente a equação.

Implementou-se um algoritmo que é uma combinação do método da continuidade com o método de Newton-Raphson [14]. Tal escolha deve-se ao menor risco de se cair em problemas de estabilidade numérica, já que os algoritmos de cálculo de raízes, que se mostram rápidos, normalmente falham em determinadas condições tais como a multiplicidade de raízes [34].

O lugar das raízes apresenta a posição dos pólos de malha fechada, de uma equação característica, como função de determinado parâmetro.

Para o desenvolvimento do método considera-se a equação característica

$$1 + K G(s) H(s) = 0 \quad (3.26)$$

que pode ser escrita como

$$B(s) + K A(s) = 0 \quad (3.27)$$

Pode-se calcular a solução de (3.27) para um ganho  $K + \Delta K$  conhecendo-se a solução desta para um ganho  $K$ .

Se  $s_{1,k}$  é a solução de (3.27) para um ganho  $K$ , a solução aproximada para o ganho  $K + \Delta K$  pode ser calculada através de (3.28),

$$s_{2,k} = s_{1,k} + \Delta s = s_{1,k} - K \frac{A(s_{1,k})}{\frac{dB(s_{1,k})}{ds} + K \frac{dA(s_{1,k})}{ds}} \quad (3.28)$$

A correção deste valor pode ser feita baseando-se na regra dos trapézios:

$$s'_{1,k} = s_{1,k} - \frac{\Delta K}{2} \frac{A(s_{1,k})}{\frac{dB(s_{1,k})}{ds} + K \frac{dA(s_{1,k})}{ds}} + \frac{\Delta K}{2} \frac{A(s_{2,k})}{\frac{dB(s_{2,k})}{ds} + (K + \Delta K) \frac{dA(s_{2,k})}{ds}} \quad (3.29)$$

O incremento  $\Delta K$  usado é ajustado a cada novo cálculo de  $s_{2,k}$  e  $s'_{1,k}$ .

Consegue-se um melhor resultado corrigindo o último ponto calculado ( $s'_{1,k}$ ) em cada iteração usando Newton-Raphson, conforme a seguinte equação:

$$s_{1,k+\Delta k} = s'_{1,k} - \frac{B(s'_{1,k}) + (K + \Delta K) A(s'_{1,k})}{\frac{dB(s'_{1,k})}{ds} + (K + \Delta K) \frac{dA(s'_{1,k})}{ds}} \quad (3.30)$$

As diversas etapas do método são ilustradas na Figura 3.1.

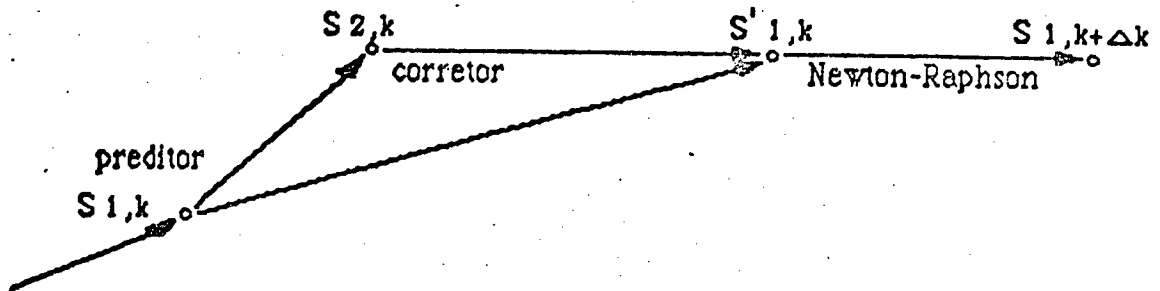


FIGURA 3.1 - Etapas do algoritmo para cálculo do lugar das raízes.

Este procedimento de ajuste traça os ramos do lugar das raízes de forma contínua, unindo os pontos  $s_{1,k}$  e  $s_{1,k+\Delta k}$  da Figura 3.1, interrompendo-se somente quando for detectada a proximidade de um zero da função ou um ponto de quebra do lugar das raízes.

### 3.4 - Simulação

O algoritmo implementado executa a simulação de modelos multivariáveis e não-lineares [26].

Os modelos são representados através dos blocos existentes na biblioteca do programa e são apresentados no apêndice D. A descrição dos modelos é efetuada através da sua topologia e, também, da natureza e dos parâmetros dos blocos.

Antes da simulação executa-se o procedimento de ordenamento dos blocos do modelo que estabelece a seqüência em que os blocos são simulados ou emite uma mensagem acusando a existência de "loop" algébrico.

Implementaram-se procedimentos auxiliares que permitem ao usuário efetuar modificações na topologia e nos parâmetros do modelo.

Para executar a simulação o programa considera as condições iniciais, o passo de integração, o tempo de simulação e as informações para o armazenamento, no "buffer" de curvas, das variáveis definidas pelo usuário.

#### 3.4.1 - Estrutura de dados

A estrutura de dados criada para armazenar as informações do modelo constitui-se dos seguintes dados: número do bloco, diretiva que identifica a sua natureza, nome, número dos blocos cujas saídas são utilizadas para calcular-se sua entrada, condição inicial, valor da entrada, valor da saída e parâmetros dos blocos.

#### 3.4.2 - Biblioteca de blocos

A biblioteca, implementada no programa, está dividida, em seis (6) grupos de blocos: blocos sem entrada, blocos com memória, blocos sem memória, blocos estáticos, blocos de funções e blocos gerais. Os grupos, os blocos e suas relações saída/entrada são apresentados no apêndice D.

A divisão em grupos tem por objetivo dar uma estrutura à biblioteca de forma a facilitar o seu acesso durante a definição de um modelo e, também, o ordenamento dos blocos para a simulação.

No grupo dos blocos sem entrada existe o bloco entrada A/D, porém sua entrada é externa ao modelo, isto é, proveniente

de um conversor analógico/digital e para fins de ordenamento esta diferença é muito importante.

Os blocos dos demais grupos possuem três entradas com exceção dos blocos multiplicador, divisor e ganho controlado que possuem apenas duas.

### 3.4.3 - Descrição topológica do modelo

Todo o modelo deve ter seus blocos numerados. A estrutura topológica do modelo é declarada, bloco a bloco, através do número do bloco, de um conjunto de caracteres para sua identificação, e dos números dos blocos que lhes servem de entrada. A entrada de cada bloco é uma combinação algébrica das saídas de até três blocos e é definida através dos números destes. Ao definirem-se as entradas de um bloco pode-se escrever diretamente o número daquele cuja saída será considerada ou então, o número com o sinal menos, significando que será considerada a saída com o sinal trocado.

Concluída esta etapa, deve-se declarar a natureza e os parâmetros de cada bloco.

### 3.4.4 - Descrição da natureza e dos parâmetros dos blocos

Cada bloco do modelo representa uma determinada função dentre as que estão disponíveis na biblioteca.

A natureza do bloco é caracterizada através de um mne-mônico de três caracteres que pode ser observado na listagem apresentada no anexo I. Dependendo da natureza, o bloco pode ter até seis (6) parâmetros caracterizados por A, B, C, D, E ou F.

Por ocasião destas definições, efetua-se a consistência entre a natureza do bloco e a declaração da topologia do modelo. Com este procedimento, evita-se que um bloco, em cujas entradas existam valores não nulos, seja declarado do tipo sem entrada.

Também são validados os parâmetros do bloco evitando-se, por exemplo, que o limite inferior de um limitador seja declarado maior do que o seu limite superior.

### 3.4.5 - Coeficientes de integração

Para efetuar a simulação, utilizou-se um método de integração implícito de segunda ordem. O modelo do integrador contém, além do passo de integração "h", os parâmetros "l" e "g" como pode ser observado na Figura 3.2. Estes parâmetros são fornecidos pelo usuário e, por exemplo, para  $l = 1$  e  $g = 0,5$  tem-se o método trapezoidal. O apêndice E apresenta o algoritmo de integração e o cálculo dos coeficientes para todos os blocos de natureza dinâmica.

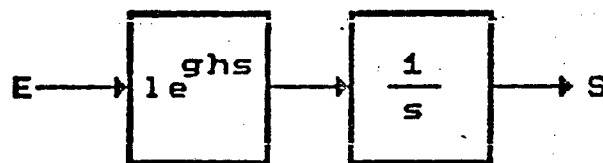


FIGURA 3.2 - Modelo do integrador.

Considerando-se o modelo apresentado, tem-se a seguinte expressão para calcular a integral:

$$s_{k+1} = s_k + l * h * [g * s'_{k+1} + (1 - g) * s'_k] \quad (3.31)$$

definindo-se os coeficientes de integração C1, C2 e C3 como segue:

$$C1 = 1 \quad (3.32)$$

$$C2 = 1 * h * g \quad (3.33)$$

$$C3 = 1 * h * (1 - g) \quad (3.34)$$

Substituindo-se (3.32), (3.33) e (3.34) em (3.31) tem-se a expressão generalizada para executar a integração numérica

$$s_{k+1} = C1 * s_k + C2 * s'_{k+1} + C3 * s'_k \quad (3.35)$$

No apêndice E são derivados os coeficientes de integração para os demais blocos da biblioteca.

Este algoritmo é estável numericamente, apresenta boa precisão e é bastante rápido para executar a simulação.

#### 3.4.6 - Curvas de saída

Os resultados da simulação são apresentados sob a forma gráfica. O usuário deve definir os blocos, cujas saídas serão armazenadas, para posterior apresentação, através de seu número.

O programa permite que um máximo de vinte e cinco (25) blocos tenham suas saídas armazenadas, simultaneamente, a cada execução da simulação.

### 3.5 - Transformações auxiliares

Para se utilizar as ferramentas clássicas de análise disponíveis no programa, é necessário dispor-se dos modelos linearizados e sob a forma de função de transferência. A maioria dos modelos utilizados para representar os sistemas de controle dos SEP's é multivariável, não-linear e apresenta-se sob a forma de diagrama de blocos compatíveis com a modelagem utilizada na simulação. Assim sendo, é imprescindível a redução destes à forma anteriormente citada para possibilitar o uso daquelas ferramentas.

A redução dos modelos é efetuada em duas etapas. Primeiramente obtém-se a equação de estado do modelo linearizado em torno do ponto de operação, posteriormente obtém-se a matriz de transferência através do algoritmo de Fadeev-Leverrier [7].

#### 3.5.1 - Obtenção da equação dinâmica

Para se obter a equação dinâmica, que representa um modelo multivariável e não-linear, implementou-se o algoritmo do modelo incremental. Esta opção deve-se a facilidade de compatibilização deste com a estrutura dos modelos declarados para a simulação, versatilidade para tratar todos os blocos da biblioteca, bons resultados numéricos e facilidade de implementação.

O algoritmo consiste, basicamente, em obter-se os coeficientes das matrizes A, B, C e D a partir da aplicação de um pequeno distúrbio, em torno do ponto de operação, em cada variável de entrada e de estado do modelo verificando-se sua repercussão em cada derivada e variável de saída do modelo, respectivamente.



Considerando-se a seguinte equação de estado:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{D} \mathbf{u} \end{aligned} \quad (3.36)$$

sendo:

$n$  - ordem do sistema  
 $n_e$  - número de entradas  
 $n_s$  - número de saídas

tem-se:

$\mathbf{A}$   
 $n \times n$   
 $\mathbf{B}$   
 $n \times n_e$   
 $\mathbf{C}$   
 $n_s \times n$   
 $\mathbf{D}$   
 $n_s \times n_e$

obtêm-se os coeficientes:

$$a_{i,j} = \frac{\Delta x'_i}{\Delta x_j} \quad (3.37)$$

para

$\Delta x_j = \text{degrau incremental}$       $\Delta x_k = 0.0 \quad k \neq j$   
 $\Delta u_k = 0.0 \quad k = 1, 2, \dots, n_e$

$$b_{i,j} = \frac{\Delta x'_i}{\Delta u_j} \quad (3.38)$$

para

$\Delta x_k = 0.0 \quad k = 1, 2, \dots, n$

$$\Delta u_j = \text{degrau incremental} \quad \Delta u_k = 0.0 \quad k \neq j$$

$$c_{i,j} = \frac{\Delta y_i}{\Delta x_j} \quad (3.39)$$

para

$$\Delta x_j = \text{degrau incremental} \quad \Delta x_k = 0.0 \quad k \neq j$$

$$\Delta u_k = 0.0 \quad k = 1, 2, \dots, n$$

$$d_{i,j} = \frac{\Delta y_i}{\Delta u_j} \quad (3.40)$$

para

$$\Delta x_k = 0.0 \quad k = 1, 2, \dots, n$$

$$\Delta u_j = \text{degrau incremental} \quad \Delta u_k = 0.0 \quad k \neq j$$

O algoritmo efetua o cálculo dos coeficientes, acima referidos, sobre o modelo declarado para simulação. Para sua execução, é necessário, para os modelos não-lineares, que estes estejam completamente estabilizados em torno do ponto de operação desejado, isto é, todas as suas derivadas estejam iguais a zero. Isto é obtido, por decisão do usuário, através do algoritmo de simulação.

Os blocos não-lineares tipo limitador, zona morta, etc, poderão ser previamente tratados pelo usuário. Por exemplo, um bloco do tipo zona morta, dependendo do degrau incremental definido pelo usuário, poderá abrir a malha, causando um resultado indesejado. Isto pode ser evitado redefinindo-se o bloco como um ganho unitário.

### 3.5.2 - Transformação de uma equação dinâmica para uma matriz de transferência

Para obter-se a matriz de transferência a partir de uma equação dinâmica implementou-se o algoritmo de Fadeev-Leverrier [3]. Este algoritmo, aliado ao algoritmo para obtenção de uma equação dinâmica, permite que se obtenha cada uma das funções de transferência existentes em um determinado modelo multivariável e não-linear.

A aplicação deste algoritmo a sistemas de ordem elevada (maior que 10), deve levar em conta o condicionamento das matrizes, pois este fato influencia significativamente a qualidade do resultado. Para melhorar o condicionamento da matriz A, efetuou-se um escalamento, utilizando-se o conceito de medida de matriz [28], que resultou numa melhora significativa no desempenho do algoritmo.

O escalamento da matriz A é efetuado como segue:

$$K1 = \text{Menor}_i \left| \begin{array}{c} a_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |a_{ik}| \end{array} \right| \quad (3.41)$$

$$K2 = \text{Maior}_i \left| \begin{array}{c} a_{ii} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |a_{ik}| \end{array} \right| \quad (3.42)$$

$$\text{FEA} = \text{Maior} [K1, K2] \quad (3.43)$$

onde

FEA : Fator de escalamento da matriz A

$$\hat{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{FEA} \quad (3.44)$$

para

$$i = 1, 2, \dots, n \quad \text{e} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

A matriz de transferência da equação dinâmica (3.36) é obtida com o segue:

$$M(s) = C (sI - \hat{A})^{-1} B + D \quad (3.45)$$

$$(sI - \hat{A})^{-1} = \frac{\text{Adj}(sI - \hat{A})}{\det(sI - \hat{A})} \quad (3.46)$$

Substituindo (3.46) em (3.45) obtém-se:

$$M(s) = \frac{1}{\det(sI - \hat{A})} (C \text{Adj}(sI - \hat{A}) B + D \det(sI - \hat{A})) \quad (3.47)$$

Considerando as seguintes expressões:

$$F(s) = C \text{Adj}(sI - \hat{A}) B + D \det(sI - \hat{A}) \quad (3.48)$$

$$\text{Adj}(sI - \hat{A}) = E_0 s^{n-1} + E_1 s^{n-2} + \dots + E_{n-2} s + E_{n-1} \quad (3.49)$$

$$\det(sI - \hat{A}) = s^n + a(1) s^{n-1} + \dots + a(n-1) s + a(n) \quad (3.50)$$

Substituindo (3.49) e (3.50) em (3.48) tem-se:

$$F(s) = D s^n + (C E_0 B + D a(1)) s^{n-1} + (C E_1 B + D a(2)) s^{n-2} + \dots + (C E_{n-2} B + D a(n-1)) s + (C E_{n-1} B + D a(n)) \quad (3.51)$$

O algoritmo para obtenção de  $E_k$ ,  $a(k)$  e  $F(k)$  é constituído dos seguintes passos:

$$\text{passo 1 : } E_0 = I$$

$$\text{passo 2 : } k = 1$$

$$\text{passo 3 : } a(k) = - (1 / k) \text{ traço } (\hat{A} * E_{k-1}) \quad (3.52)$$

$$\text{passo 4 : } F_k = C * E_{k-1} * B + a(k) * D$$

$$\text{passo 5 : } E_k = \hat{A} * E_{k-1} + a(k) * I$$

$$\text{passo 6 : } k = k + 1$$

$$\text{passo 7 : } k \leq n$$

Repetem-se os passos 3, 4, 5, 6 e 7 enquanto a condição do passo 7 for satisfeita.

Obtidos os polinômios (3.51) e (3.50), que representam os numeradores e os denominadores das funções de transferência da matriz  $M(s)$ , procede-se ao reescalamento. Para tanto, multiplica-se cada coeficiente pelo fator de escalamento elevado na potência do termo em "s" correspondente.

Observa-se, a partir de (3.47), que o polinômio do denominador das funções de transferência é a própria equação característica da matriz  $A$ . Este fato sugere que podem existir cancelamentos entre zeros e pólos destas funções, principalmente no caso multivariável. Implementou-se um algoritmo, que é apresentado a seguir, para estes cancelamentos.

### 3.5.3 - Cancelamento de zeros e pólos

O algoritmo implementado para efetuar os cancelamentos desenvolve-se em três fases. Inicialmente, calculam-se os zeros

e pólos da função de transferência. Em seguida, calculam-se todas as distâncias relativas, entre os zeros e os pólos, e selecionam-se aquelas que são menores do que uma determinada tolerância fornecida pelo usuário. Finalmente, efetuam-se os cancelamentos, partindo-se da menor para a maior distância, dentre aquelas selecionadas.

### 3.6 - Conclusões

Inicialmente, apresentaram-se os algoritmos implementados para efetuar a identificação dos sistemas físicos. Descreveu-se o algoritmo de Levy utilizado para efetuar a identificação freqüencial. Foram enfatizadas as modificações introduzidas com o objetivo de melhorar o seu desempenho. Para efetuar a identificação temporal, implementou-se o algoritmo de correlação dos dados para o domínio da freqüência para posteriormente utilizar-se o algoritmo de identificação freqüencial. Justificou-se a utilização desta estratégia.

Em seguida, apresentaram-se os métodos de análise. Descreveu-se o algoritmo de resposta em freqüência que apresenta seus resultados através dos diagramas de Bode, Nyquist e Nichols. Apresentou-se o algoritmo do lugar das raízes, cuja implementação baseou-se no método da continuidade combinado com o método de Newton.

Apresentou-se o algoritmo implementado para efetuar a simulação de modelos multivariáveis e não-lineares. Descreveu-se a estrutura do modelo, a biblioteca de blocos, o método de integração numérica e a apresentação dos resultados.

Finalmente, apresentaram-se os algoritmos que efetuam transformações auxiliares. Descreveu-se o algoritmo que obtém a equação de estado a partir do modelo declarado para simulação. Descreveu-se, também, o algoritmo que efetua a transformação de uma equação de estado para uma matriz de transferência. Foram comentados, ainda, os algoritmos para produto de polinômios, cálculo de raízes e cancelamento de zeros e pólos.

## CAPÍTULO 4

### INTERFACES PARA COMUNICAÇÃO COM O USUÁRIO

#### 4.1 - Introdução

Neste capítulo apresentam-se os mecanismos utilizados para realizar a comunicação entre o programa e o usuário.

É apresentado o sistema de "menus", através do qual seleciona-se a função do programa que será ativada.

Descreve-se o sistema, através do qual desenvolve-se o diálogo, onde é realizada a entrada dos dados.

São descritos os meios de apresentação dos resultados obtidos pelo programa e, também, as mensagens emitidas quando da ocorrência de erros.

#### 4.2 - "Menus" hierárquicos para seleção das funções

O programa possui um sistema de "menus" hierárquicos através do qual podem-se acessar todas as funções implementadas.

Apresenta-se a estrutura de "menus" na Figura 4.1 onde percebe-se que cada "menu" é apresentado em uma janela com três colunas e dez opções. A coluna da esquerda apresenta as chaves de função, a coluna central apresenta breve descrição da função e a coluna da direita apresenta uma diretiva que identifica a função.



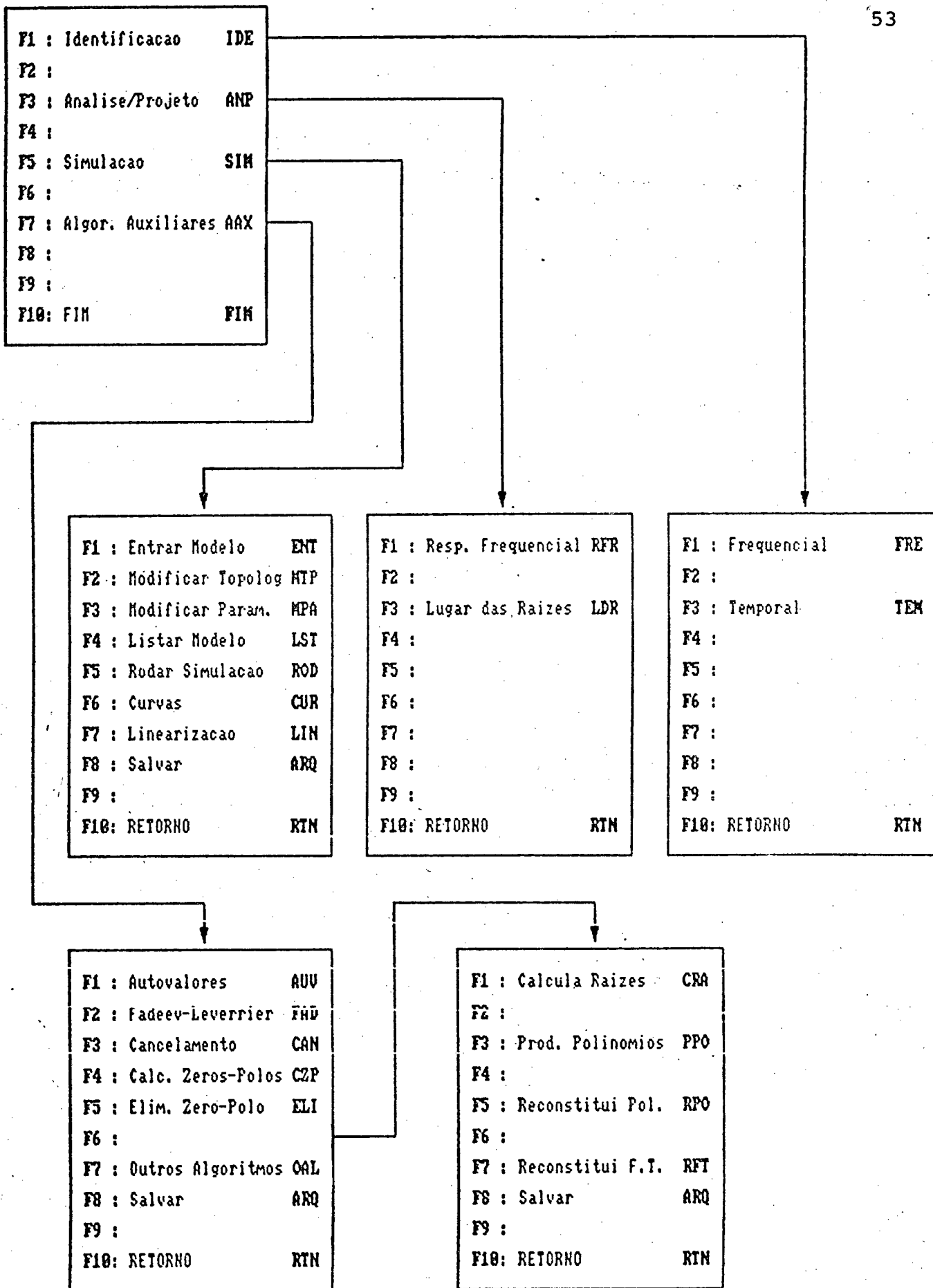


FIGURA 4.1 - Estrutura do "menu" principal.

As chaves de função são numeradas de um até dez, porém, nem todas são utilizadas. As diretivas são constituídas de três caracteres. A seleção de uma determinada função é efetuada através da chave de função ou da diretiva correspondente. Pode-se ver, na estrutura apresentada na Figura 4.1, que algumas opções dentro dos "menus" ativam outros "menus" enquanto outras ativam diretamente uma função do programa.

A alternativa de seleção através das chaves de função permite o acesso somente àquelas opções que estão mostradas no "menu" ativo, enquanto as diretivas permitem o acesso a qualquer uma das opções disponíveis nesta estrutura, independente de qual dos seus "menus" esteja ativo.

No "menu" principal existem as seguintes opções:

F1 : ativa o "menu" com as opções de algoritmos disponíveis para a identificação.

F3 : ativa o "menu" com as opções de algoritmos disponíveis para a análise.

F5 : ativa o "menu" com as opções relativas ao algoritmo de simulação

F7 : ativa o "menu" com as opções relativas aos algoritmos auxiliares.

F10: ativa o encerramento do programa.

A ativação da função 'FIM' no "menu" principal fará o encerramento do programa após sua confirmação. Este encerramento implica em desalocar todas as estruturas da base de dados, que são alocadas dinamicamente na memória do computador, e desativar todas as janelas que estejam ativas.

#### 4.2.1 - Identificação

Após a ativação da função Identificação no "menu" principal é apresentado o "menu" cujas funções significam o seguinte:

- F1 : ativa o diálogo referente ao algoritmo de identificação freqüencial.
- F3 : ativa o diálogo referente ao algoritmo de identificação temporal.
- F10: retorna ao "menu" imediatamente anterior na hierarquia.

#### 4.2.2 - Análise e projeto

A ativação da função Análise/Projeto no "menu" principal provoca a apresentação do "menu" cujas funções são:

- F1 : ativa o diálogo referente ao algoritmo de resposta em freqüência.
- F3 : ativa o diálogo referente ao algoritmo de traçado do lugar das raízes.
- F10: retorna ao "menu" imediatamente anterior na hierarquia.

#### 4.2.3 - Simulação

A ativação da função Simulação no "menu" principal acessa o "menu" cujas funções são:

- F1 : ativa o diálogo referente à entrada de modelo para o algoritmo da simulação.
- F2 : ativa o diálogo referente à modificação de topologia do modelo armazenado na base de dados.
- F3 : ativa o diálogo referente à modificação de parâmetros do modelo armazenado na base de dados.
- F4 : apresenta na tela a estrutura do modelo armazenado na base de dados.
- F5 : ativa a execução da simulação do modelo armazenado na base de dados.
- F6 : ativa o diálogo referente a apresentação das curvas armazenadas no "buffer" ou nos arquivos em disco.
- F7 : ativa o diálogo referente ao algoritmo de obtenção da equação dinâmica.
- F8 : ativa o diálogo referente ao armazenamento de modelos e/ou curvas em arquivo de disco.
- F10: retorna ao "menu" imediatamente anterior na hierarquia.

A maioria das funções apresentadas neste "menu" visam permitir, ao usuário, efetuar modificações no modelo e apresentá-lo na tela.

#### 4.2.4 - Algoritmos auxiliares

A ativação da função Algor. Auxiliares no "menu" principal acessa o "menu" cujas funções são:

- F1 : ativa o diálogo referente ao algoritmo para cálculo de autovalores.
- F2 : ativa o diálogo referente ao algoritmo de Fadeev-Leverrier.
- F3 : ativa o diálogo referente ao algoritmo para cancelamento de zeros e pólos.
- F4 : ativa o diálogo referente ao algoritmo que calcula zeros e pólos.
- F5 : ativa o diálogo referente à eliminação de zero e/ou pólo de uma função de transferência.
- F7 : ativa o "menu" referente aos outros algoritmos.
- F8 : ativa o diálogo referente ao procedimento para armazenamento de dados em arquivos.
- F10: retorna ao "menu" imediatamente anterior na hierarquia.

#### - Outros algoritmos

A ativação da função Outros Algoritmos neste "menu" acessa o "menu" cujas funções são:

- F1 : ativa o diálogo referente ao algoritmo do cálculo de raízes.
- F3 : ativa o diálogo referente ao algoritmo do produto de polinômios.
- F5 : ativa o diálogo referente ao algoritmo que reconstitui polinômios.
- F7 : ativa o "menu" referente ao algoritmo que reconstitui função de transferência.

F8 : ativa o diálogo referente ao procedimento para armazenamento de dados em arquivos.

F10: retorna ao "menu" imediatamente anterior na hierarquia.

O programa possui, ainda, mais dois "menus" que são apresentados após a apresentação dos relatórios e dos gráficos respectivamente. A Figura 4.2 apresenta estes "menus".

F1 : Modificar	MOD	F1 : Modificar	MOD
F2 :		F2 :	
F3 : Relatorio	REL	F3 : Ler Pontos	LPT
F4 :		F4 : Zoom	ZUM
F5 : Imprimir	PRI	F5 : Texto	TEX
F6 :		F6 : Grade	GRA
F7 :		F7 :	
F8 : Salvar	ARQ	F8 : Salvar	ARQ
F9 :		F9 :	
F10: RETORNO	RTN	F10: RETORNO	RTN

a b

FIGURA 4.2 - "Menus" de saída.

As funções do "menu" que é apresentado após os relatórios de saída significam:

F1 : retorna ao diálogo referente ao algoritmo cujos resultados foram apresentados na tela.

F3 : retorna ao relatório anteriormente apresentado.

F5 : ativa o procedimento de impressão do relatório anteriormente apresentado.

F8 : ativa o diálogo referente ao procedimento para armazenamento de dados em arquivos.

F10: retorna ao "menu" imediatamente anterior na hierarquia.

As funções do "menu" que é apresentado após os gráficos significam:

F1 : retorna ao diálogo referente ao algoritmo cujos resultados foram apresentados na tela.

F3 : ativa o procedimento de leitura de pontos dos gráficos da tela.

F4 : ativa o procedimento que executa a ampliação de parte do gráfico mostrado.

F5 : ativa o procedimento que permite a edição sobre a tela gráfica.

F6 : ativa o procedimento que executa um gradeado sobre a tela gráfica.

F8 : ativa o diálogo referente ao procedimento para armazenamento de dados em arquivos.

F10: retorna ao "menu" imediatamente anterior na hierarquia.

A seleção de uma determinada função da estrutura do "menu" principal ativa o procedimento que efetua o gerenciamento da base de dados na memória do computador. Este gerenciamento desaloca as estruturas de dados que encontravam-se alocadas, na memória e que não são utilizadas pela função selecionada, e aloca as estruturas necessárias a esta função. A parte da estru-

tura de dados comum às duas funções selecionadas consecutivamente é mantida alocada na memória, preservando, desta maneira, os dados ali existentes.

#### 4.3 - Diálogos para entrada de dados

A seleção de uma determinada função do programa, através dos "menus", ativa um procedimento que realiza o diálogo para a entrada dos dados e das informações complementares para apresentação dos resultados.

Este diálogo desenvolve-se, de maneira auto explicativa, através de perguntas e "menus" auxiliares .

Na fase de edição dos dados o programa recebe um conjunto de caracteres que posteriormente passará por um procedimento de validação. Não havendo erros, os dados serão armazenados na base de dados do sistema e estarão disponíveis para utilização do respectivo algoritmo, caso contrário, o programa apresenta uma mensagem de erro e retorna ao ponto em que este ocorreu, para permitir sua correção.

O diálogo poderá ser interrompido em qualquer momento. O programa retornará ao "menu" correspondente.

Encerrado o diálogo, o procedimento que efetua a supervisão do programa ativa o procedimento que gerencia os algoritmos da função selecionada.

#### 4.4 - Relatório para apresentação dos resultados

Encerrada a execução do algoritmo, a supervisão do programa ativa o gerenciador das saídas. Este, na inexistência de erro, fará a apresentação dos relatórios.



Os resultados de saída são tratados pelo módulo de preparação dos relatórios, cuja função é formatá-los para apresentação na tela.

O procedimento que efetua a apresentação dos relatórios na tela possui recursos que permitem o completo manuseio destes como, por exemplo, a rolagem da tela para cima e para baixo.

Encerrando-se a análise do relatório, o programa apresenta o "menu" da Figura 4.2-a a partir do qual pode-se efetuar a impressão daquele ou selecionar qualquer uma das opções apresentadas.

#### 4.5 - Gráficos para apresentação dos resultados

Algumas funções do programa apresentam suas saídas na forma gráfica. Nestes casos, encerrada a execução do algoritmo, a supervisão do programa ativa o gerenciador das saídas que, na inexistência de erro, fará a apresentação dos gráficos.

O gerenciador das saídas permite que sejam abertas até quatro janelas gráficas para apresentação dos resultados. Cada janela poderá apresentar vários gráficos simultaneamente.

Juntamente com a apresentação dos gráficos, o programa apresenta o "menu" da Figura 4.2-b a partir do qual podem-se selecionar os procedimentos, descritos no item 3.2, disponíveis para o auxílio da análise dos gráficos.

#### 4.6 - Mensagens para auxílio no tratamento dos erros

O programa possui um conjunto de mensagens, associadas aos códigos de erros, que são apresentadas na ocorrência destes e que visam auxiliar o usuário na sua identificação.

A supervisão dos erros é efetuada nas diversas etapas do programa. Verificam-se os erros na entrada de dados, na execução dos algoritmos, na leitura de arquivos e na apresentação dos resultados.

#### 4.7 - Conclusões

Apresentaram-se as diversas interfaces de comunicação entre o programa e o usuário.

Inicialmente, apresentou-se a estrutura dos "menus" descrevendo-se todas as funções existentes e as formas de selecioná-las. Enfatizou-se a facilidade da seleção efetuada através das diretivas e fez-se uma breve explanação sobre os mecanismos de alocação das estruturas de dados na memória do computador.

Em seguida, descreveu-se a forma como é realizado o diálogo para entrada dos dados e os procedimentos que efetuam a validação destes.

A apresentação dos relatórios, juntamente com os mecanismos para seu manuseio, foram descritos.

Descreveu-se a apresentação dos gráficos e as funções disponíveis para análise destes.

Finalmente, apresentou-se o mecanismo de auxílio para o tratamento dos erros.

## CAPÍTULO 5

### APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO SIMAP

#### 5.1 - Introdução

Para ilustrar a aplicação do SIMAP apresenta-se o projeto do Estabilizador do Sistema de Potência (ESP) [4] da usina hidrelétrica de Itaúba, da CEEE, desenvolvido e implantado recentemente [33]. Objetiva-se, assim, demonstrar as facilidades que se teria caso o SIMAP estivesse disponível quando do projeto do ESP. Desta forma não há a preocupação rigorosa de justificar plenamente os ajustes tomados, mas sim mostrar como o programa pode ser útil no desenvolvimento de projetos desta natureza.

O ESP é um dispositivo que atua sobre o sistema de excitação de uma máquina síncrona com o propósito de prover torque de amortecimento para as oscilações eletromecânicas do sistema de potência [32].

As diversas etapas do projeto são desenvolvidas com o auxílio do programa e os resultados obtidos são confrontados com os registros efetuados nos ensaios de campo.

Descreve-se inicialmente a modelagem utilizada para a representação do sistema envolvido no projeto. A seguir apresenta-se a identificação dos componentes dinâmicos do sistema de excitação: os filtros do compensador de corrente reativa (CCR) e do sinal de tensão terminal da máquina (RT). Apresentam-se os requisitos básicos do projeto, a estrutura de estabilização proposta, o roteiro de desenvolvimento e o confronto das simulações

com os registros oscilográficos obtidos através de ensaios de campo.

## 5.2 - Modelagem da máquina síncrona contra barra infinita

Tradicionalmente utiliza-se o modelo linear de Hefron-Phillips [4] para representação do gerador em projetos de ESP, porém, neste trabalho, optou-se por representar o gerador através do modelo IV [30] de máquina acoplada a uma barra infinita através de uma reatância pura, para fazer-se uso dos recursos do programa, como será mostrado no desenvolvimento do projeto. O modelo do gerador contra a barra infinita é apresentado na Figura 5.1.

As reatâncias e constantes de tempo utilizadas no modelo do gerador foram identificadas através de ensaios de campo [31].

A Tabela 5.1 apresenta os dados do gerador e sistema de potência.

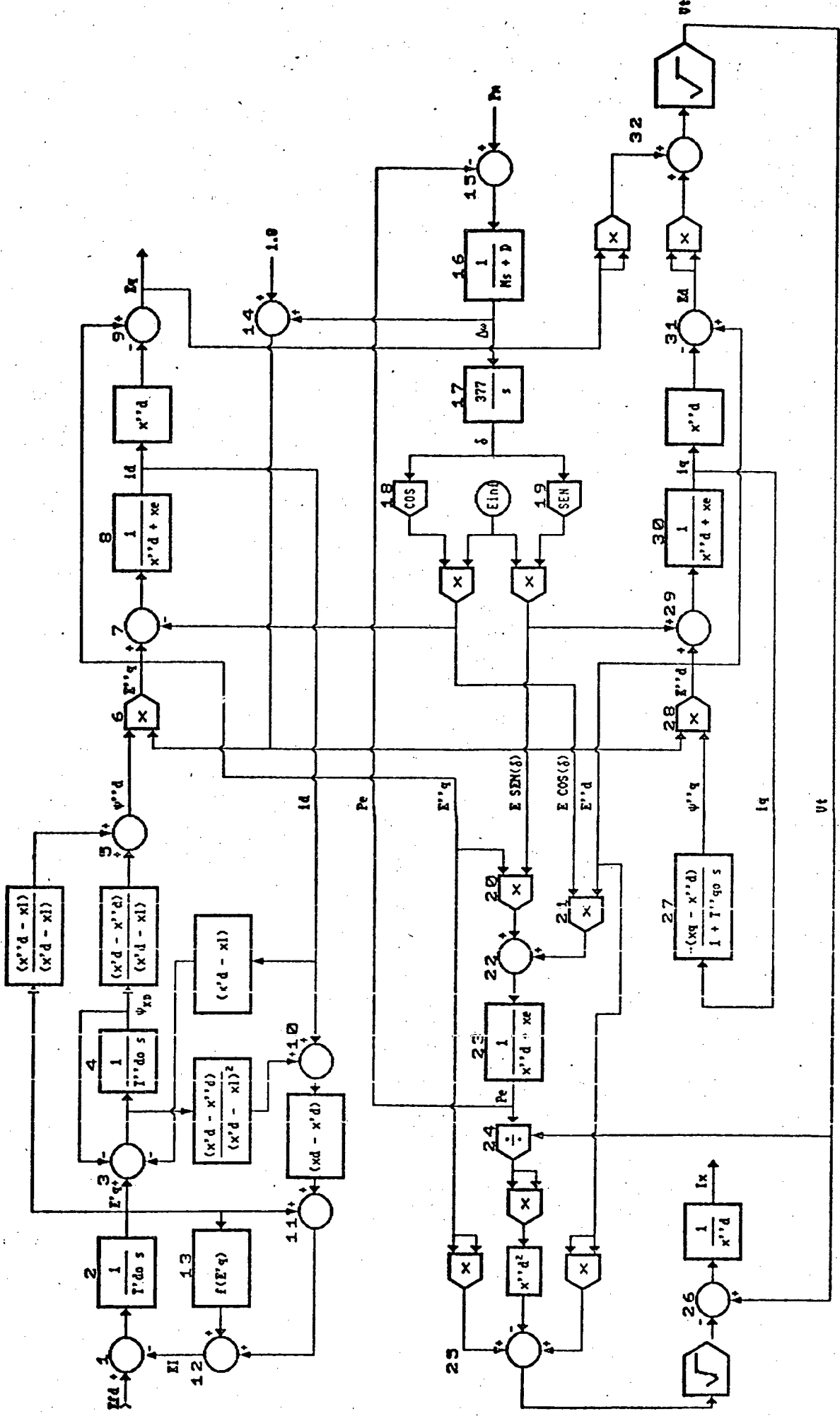


FIGURA 5.1 - Modelo do gerador contra barra infinita.

TABELA 5.1 - Dados do gerador e sistema de potência.

S	=	139 MVA
FP	=	0,85
x <sub>d</sub>	=	1,0655 pu
x' <sub>d</sub>	=	0,2581 pu
x'' <sub>d</sub>	=	0,2148 pu
x <sub>q</sub>	=	0,8110 pu
x <sub>l</sub>	=	0,1244 pu
T' <sub>do</sub>	=	9,55 s
T'' <sub>do</sub>	=	0,095 s
T'' <sub>qo</sub>	=	0,125 s
A <sub>g</sub>	=	0,02785 pu
B <sub>g</sub>	=	8,1423 pu
x <sub>e</sub>	=	0,1971 pu
M	=	7,318
D	=	0

### 5.3 - Modelagem do sistema de excitação

O sistema de excitação da UHE Itaúba é do tipo estático e seu modelo é apresentado na Figura 5.2. Este modelo foi completamente identificado através de ensaios de campo [31]. Neste trabalho apresenta-se somente a identificação dos blocos com características dinâmicas, ou seja: o filtro do regulador de tensão (RT) e o filtro do compensador de corrente reativa (CCR). A identificação dos demais blocos, aqueles de natureza estática, não será apresentada por fugir do escopo deste trabalho.

Os filtros foram identificados através de ensaios de resposta em frequência e resposta ao degrau.

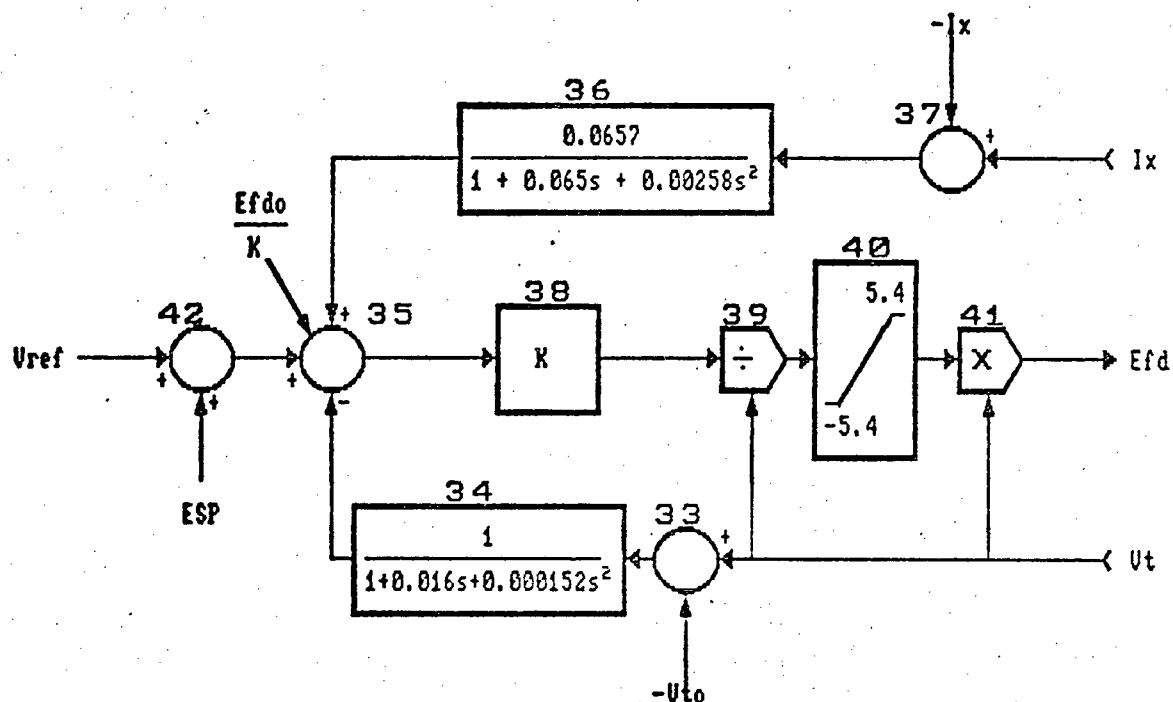


FIGURA 5.2 - Modelo do sistema de excitação.

#### - Identificação do filtro do RT

O modelo obtido para representação deste bloco foi conseguido através do algoritmo de identificação freqüencial.

Na Tabela 5.2 apresentam-se os dados que foram utilizados para a identificação. Estes dados foram obtidos de registros oscilográficos efetuados em campo.

A função de transferência 5.1 é aquela atualmente disponível [31] para a representação do filtro do RT, enquanto que a função 5.2 é aquela obtida pelo SIMAP.

TABELA 5.2 - Dados para identificação do filtro do RT.

freq. (Hz)	ganho (V/V)	ângulo (graus)
1,0	1,0058	-5,40
2,0	1,0058	-11,52
4,0	1,0116	-23,62
7,0	0,9942	-45,47
9,0	0,9532	-55,14
11,0	0,8824	-75,95
13,0	0,7558	-91,47
15,0	0,6491	-104,00
18,0	0,4854	-118,93
22,0	0,3450	-133,33
26,0	0,2398	-142,11
30,0	0,1744	-150,45

$$F(s) = \frac{1}{1 + 0,016 s + 0,000152 s^2} \quad (5.1)$$

$$F(s) = \frac{0,986138}{1 + 0,0156222 s + 0,000151807 s^2} \quad (5.2)$$

Para todos os efeitos práticos, pode-se considerar desprezível a discrepância entre os dois resultados.

A validação da função 5.2 é efetuada através do confronto entre a sua resposta em frequência e os dados utilizados para sua obtenção. O gráfico da Figura 5.3 apresenta este confronto. Verifica-se que existe uma excelente correlação entre a curva ajustada e os pontos obtidos do ensaio.



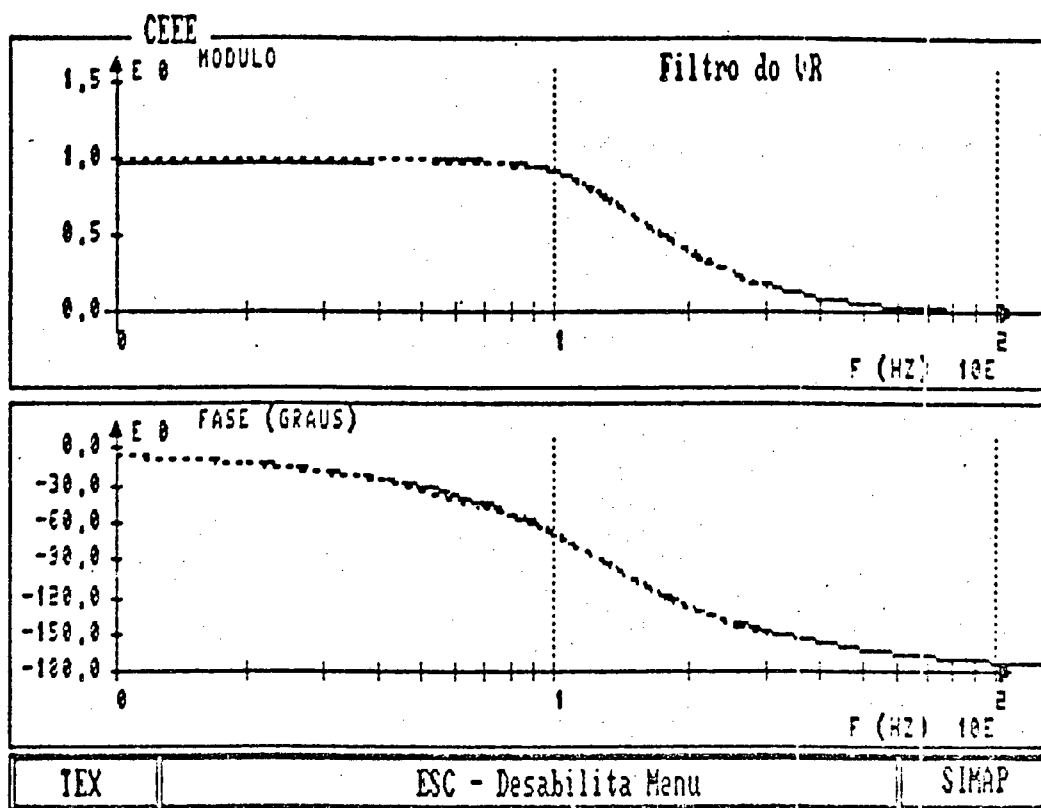


FIGURA 5.3 - Resposta em frequência do filtro do RT.

#### - Identificação do filtro do CCR

O modelo obtido para representação deste bloco foi conseguido através do algoritmo de identificação temporal.

Na Tabela 5.3 apresentam-se os dados que foram utilizados para a identificação. Estes dados também foram obtidos de registros oscilográficos efetuados em campo.

A função de transferência 5.3 é aquela atualmente disponível [31] para a representação do filtro do CCR, enquanto que a função obtida pelo SIMAP é aquela da expressão 5.4.

$$F(s) = \frac{1}{1 + 0,065 s + 0,00258 s^2} \quad (5.3)$$

$$F(s) = \frac{0,988394}{1 + 0,0659967 s + 0,00258731 s^2} \quad (5.4)$$

Comparando-se as funções 5.3 e 5.4 nota-se que os coeficientes obtido estão bastante próximos da função de transferência existente. Considere-se que a Tabela 5.3 possui apenas 14 pontos do oscilograma e estes foram truncados na terceira casa decimal. Valida-se esta função confrontando-se a sua resposta ao degrau unitário com os pontos da Tabela 5.3. A Figura 5.4 apresenta este confronto. Percebe-se que a curva da resposta ao degrau simulada apresenta boa correlação com os pontos da Tabela 5.3.

TABELA 5.3 - Dados para identificação do CCR.

tempo (s)	amplitude (Volts)
0,00	0,000
0,04	0,214
0,08	0,586
0,12	0,876
0,16	1,028
0,20	1,072
0,24	1,062
0,28	1,034
0,32	1,012
0,36	0,999
0,40	0,995
0,44	0,995
0,48	0,997
0,52	1,001

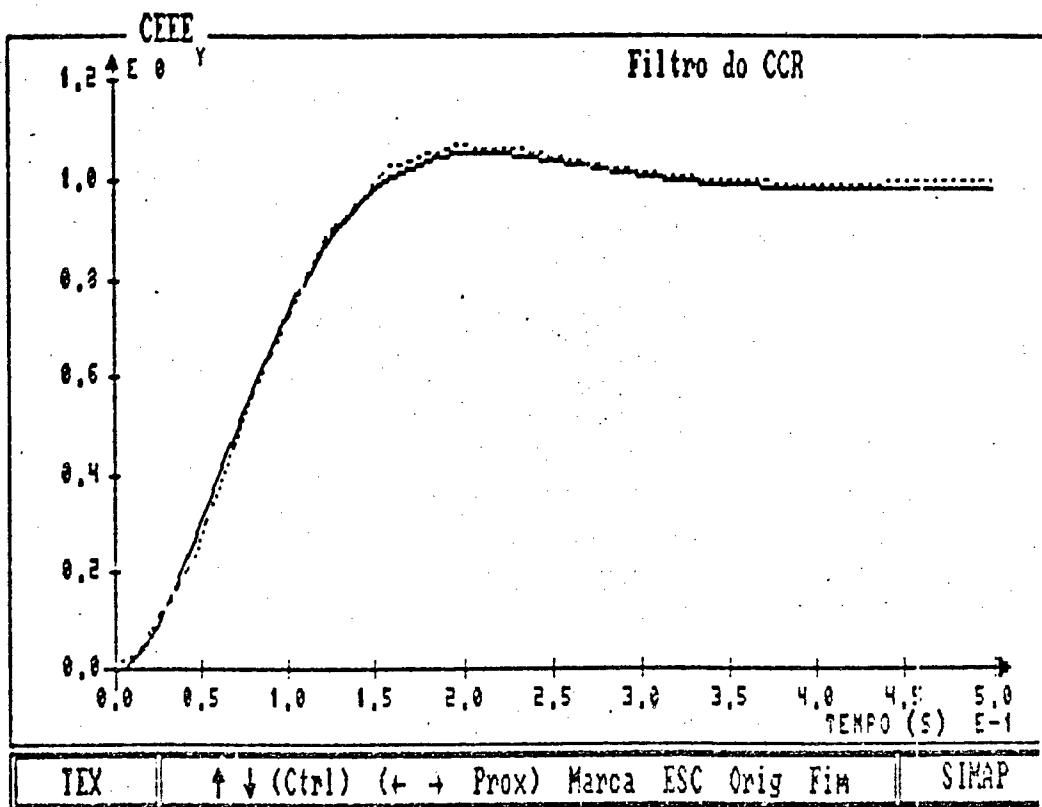


FIGURA 5.4 - Resposta ao degrau do filtro do CCR.

#### - Ajuste do controlador de tensão

Efetuuou-se o ajuste do ganho do controlador de tensão com a máquina operando a vazio [31]. Para representar-se o gerador nesta condição utilizou-se o modelo apresentado na Figura 5.5.

A função de transferência  $V_t/V_{ref}$ , com o gerador a vazio em malha aberta, é obtida a partir da equação incremental do modelo e sua posterior transformação em função de transferência através do algoritmo de Fadeev-Leverrier.

Utiliza-se o algoritmo do lugar das raízes para ajustar-se o valor do ganho. Na Figura 5.6, o gráfico superior apre-

senta o lugar das raízes completo enquanto o gráfico inferior apresenta uma ampliação da parte central do anterior.

Para se obter um par de pólos dominantes, convenientemente posicionado no plano complexo, adotou-se o valor do ganho igual a 200. A Figura 5.7 apresenta a resposta da tensão terminal, em malha fechada, ao aplicar-se um degrau na referência do controlador da tensão com o ganho ajustado.

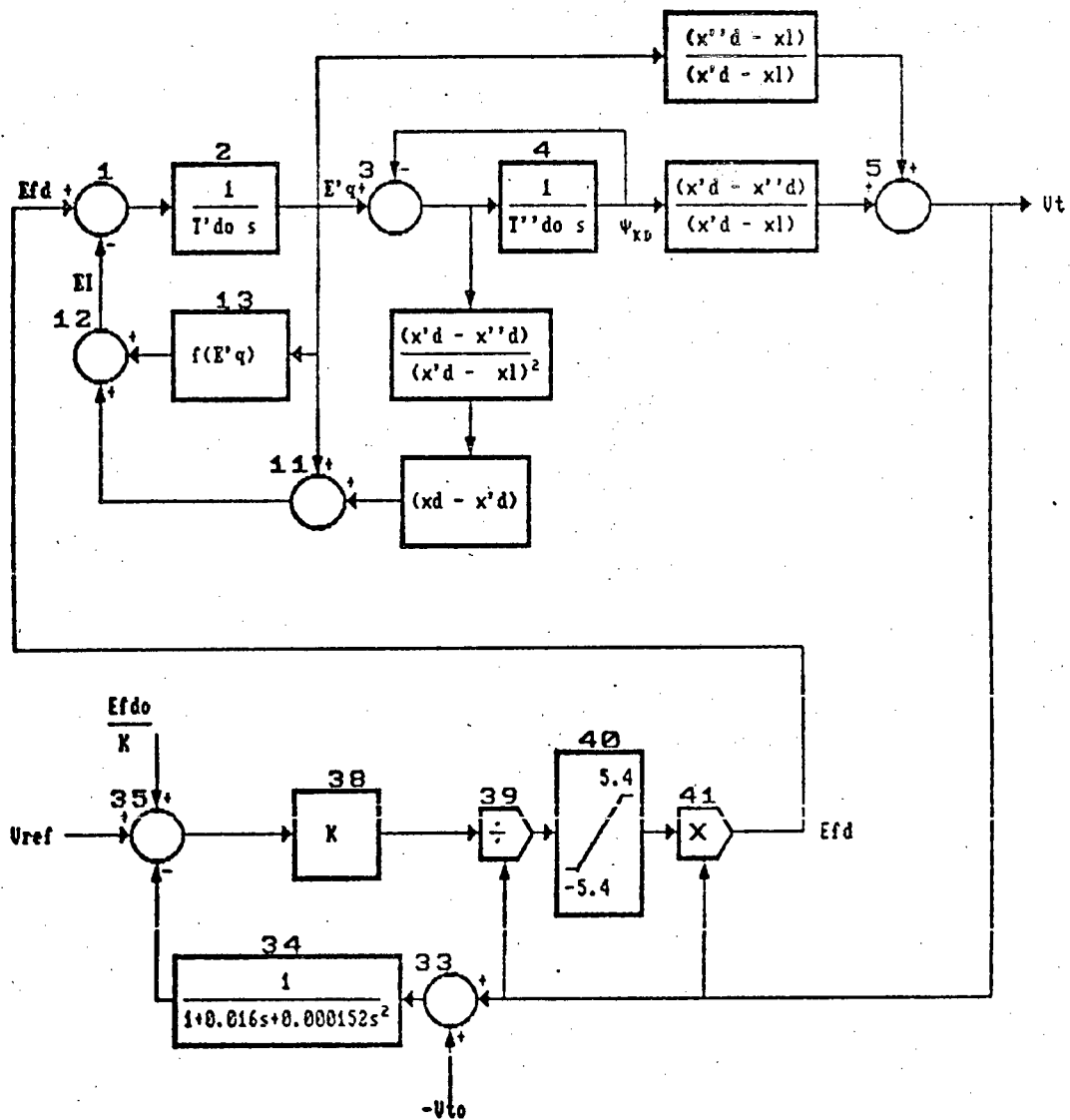


FIGURA 5.5 - Modelo do gerador a vazio.

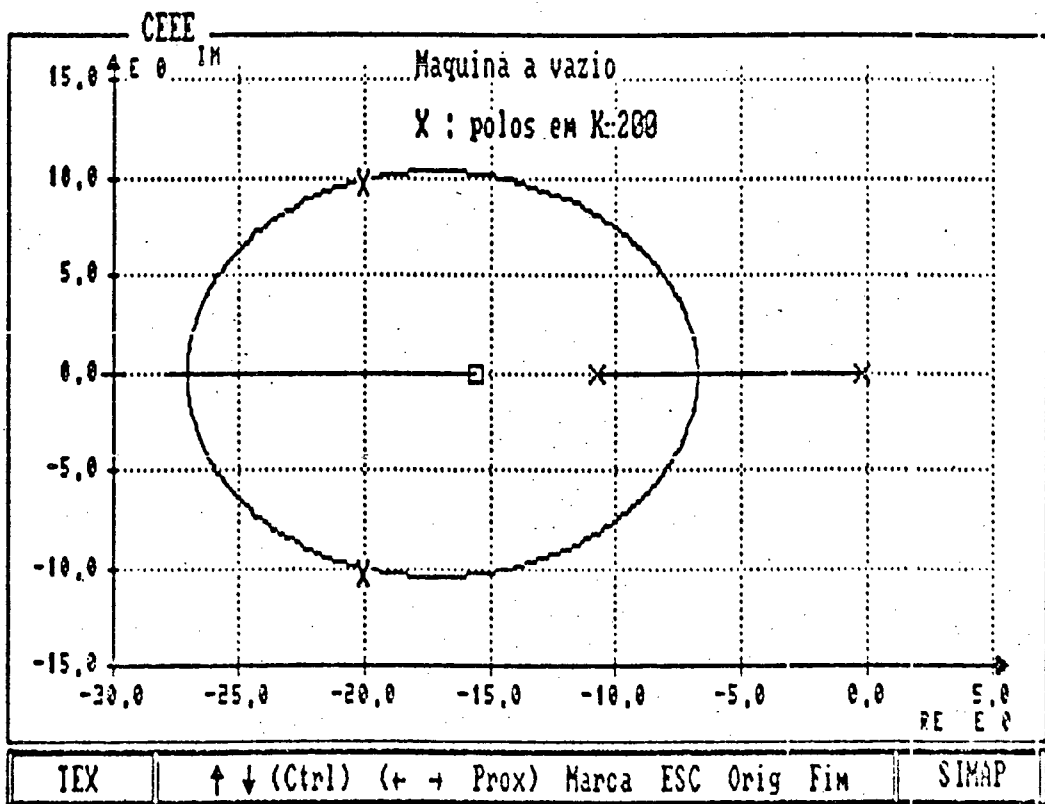
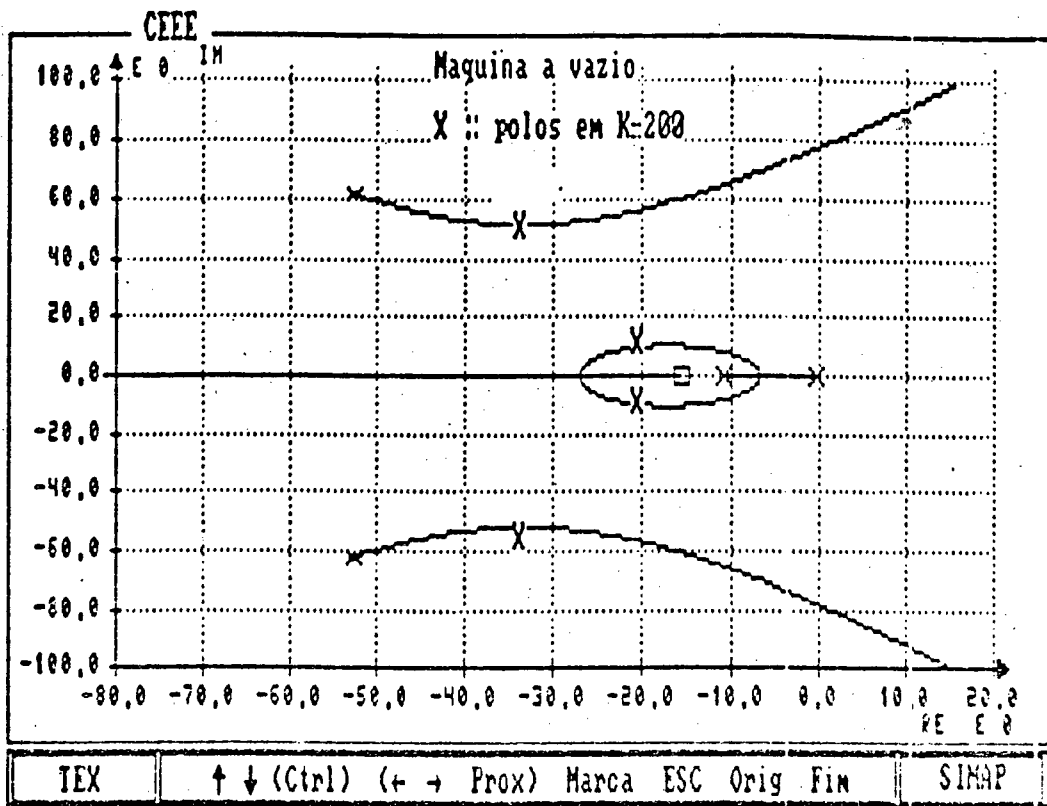


FIGURA 5.6 - Lugar das raízes da função  $V_t/V_{ref}$  em malha aberta.

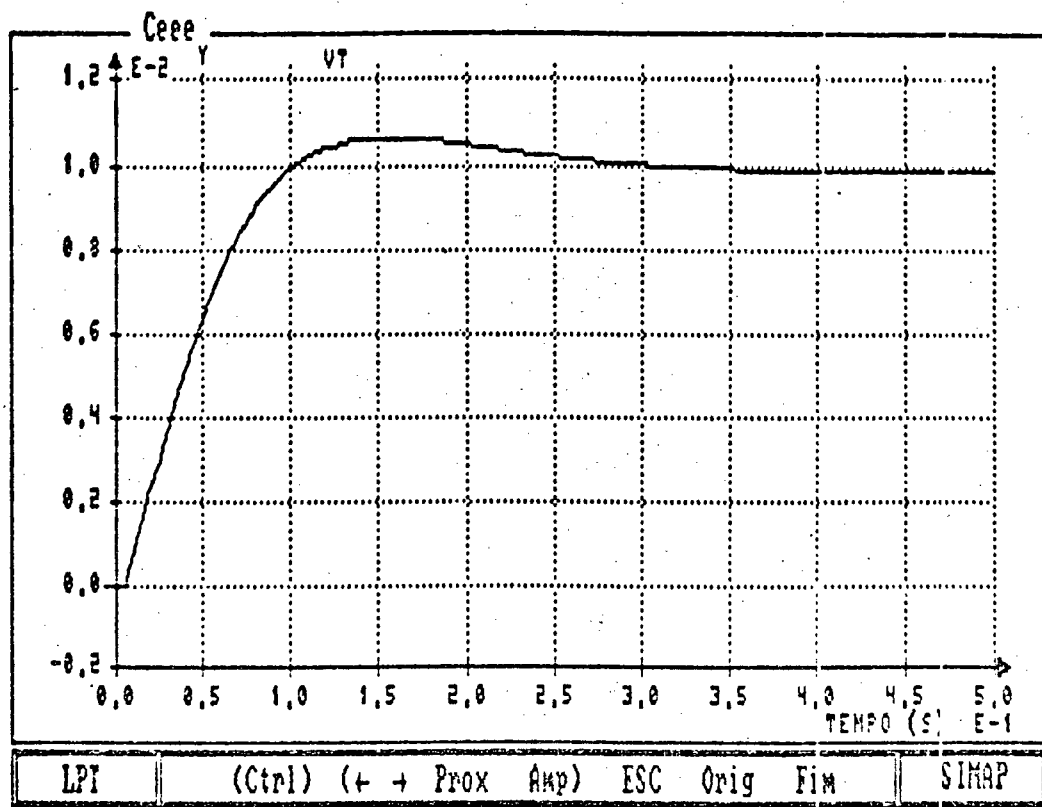


FIGURA 5.7 - Resposta ao degrau do gerador a vazio com ganho igual a 200.

#### 5.4 - Projeto do estabilizador

O projeto de um ESP envolve três etapas básicas: a definição da variável que será utilizada para a estabilização, a estrutura dos compensadores e filtros e a definição da lógica de bloqueio e reconexão [33]. Este trabalho atem-se somente ao ajuste dos compensadores e filtros.

O ESP implantado na usina hidrelétrica de Itaúba utiliza o sinal da potência de aceleração para prover o amortecimento suplementar. Esta potência é obtida a partir da combinação dinâmica da potência elétrica e do desvio de frequência.

#### 5.4.1 - Requisitos operacionais e estratégia adotada

O ESP tem por função primordial o amortecimento das oscilações eletromecânicas do SEP e, para tanto, é necessário que cumpra com os seguintes requisitos:

- Robustez em relação às variações da carga, ou seja, o ESP deve manter o seu desempenho em diferentes condições de operação da máquina.

- Robustez em relação às variações do sistema, o que equivale a dizer que o ESP deve manter o seu desempenho diante de diferentes configurações do SEP.

- Rejeição às tomadas de carga, ou seja, baixa sensibilidade da tensão terminal da máquina às variações lentas da potência mecânica.

Procura-se desenvolver o projeto a partir do seguinte roteiro:

- Definição de uma condição de despacho. Considerando que a máquina admite uma determinada faixa de operação, deve-se escolher uma condição, dentro desta faixa, para a qual se procederá o ajuste do ESP;

- Linearização do modelo;

- Obtenção da função de transferência  $V_t/V_{ref}$ ;

- Verificação da compensação de fase necessária;

- Verificação do ganho e fase através dos diagramas de

Bode;

- Simulações de resposta ao degrau variando a carga e variando a reatância externa;

- Simulação de tomada de carga;

### 5.4.2 - Estrutura de estabilização

A estrutura de estabilização e filtros adotada neste projeto [33] é apresentada na Figura 5.8.

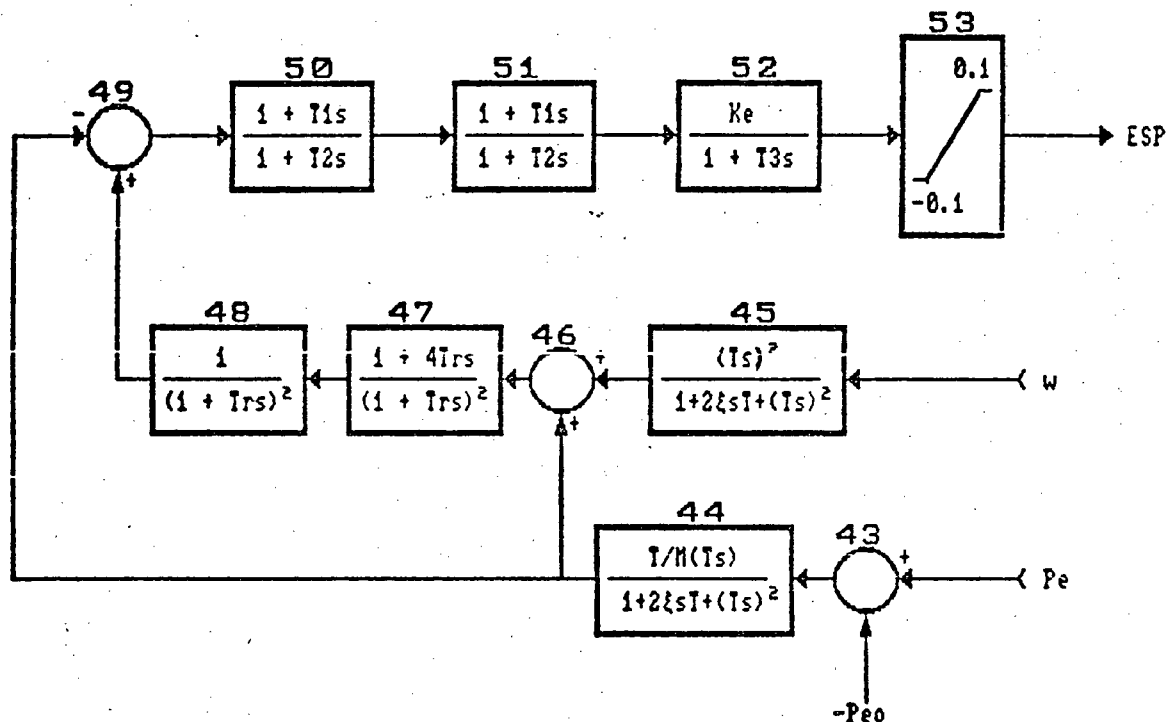


FIGURA 5.8 - Modelo do ESP.

Na Figura 5.8 observa-se que deverão ser ajustados os seguintes parâmetros:

- T : ajuste da frequência de corte inferior do ESP.
- T1 e T2 : compensação de fase.
- Tr : ajuste da frequência de corte do canal de velocidade.
- Ke : ganho do estágio de amplificação.
- T3 : filtro de saída do ESP.



### 5.4.3 - Etapas do desenvolvimento do projeto

Para desenvolver-se o projeto foi adotada a seguinte condição de operação do gerador:

$$P_e = 120 \text{ MW}$$

$$Q = 0,0 \text{ MVAR}$$

$$V_t = 1,0 \text{ pu}$$

#### - Modelo incremental

Como o sinal do ESP é somado ao sinal de referência do controlador de tensão, torna-se necessário compensar o atraso de fase introduzido pelo RT. Para conhecer-se o atraso da fase, necessita-se a função de transferência  $V_t/V_{ref}$  e, para isto, precisa-se do modelo incremental do sistema representado pela união dos diagramas das Figuras 5.1 e 5.2. A equação dinâmica obtida é apresentada no anexo II.

#### - Obtenção da função de transferência $V_t/V_{ref}$

A função de transferência  $V_t/V_{ref}$ , com a estrutura 5.5, é obtida através do algoritmo de Fadeev-Leverrier aplicado ao modelo incremental do anexo II.

$$\frac{V_t}{V_{ref}} = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_m s^m}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^n} \quad (5.5)$$

Os coeficientes dos polinômios do numerador e do denominador são apresentados na Tabela 5.4.

TABELA 5.4 - Coeficientes da função de transferência  $V_t/V_{ref}$ .

CEE	
Funcao de Transferencia G (1,1)	
Numerador	Denominador
a0 = 3.2989470E+11	b0 = 2.3377480E+11
a1 = 7.9364420E+10	b1 = 1.0331790E+11
a2 = 1.1837980E+10	b2 = 1.9965720E+10
a3 = 1.2254180E+09	b3 = 2.5985710E+09
a4 = 8.1139260E+07	b4 = 2.4524800E+08
a5 = 3.3673280E+06	b5 = 1.5244680E+07
a6 = 8.1342400E+04	b6 = 6.0124360E+05
a7 = 9.1954580E+02	b7 = 1.4158420E+04
a8 = 5.5538100E+00	b8 = 1.6240910E+02
	b9 = 1.0000000E+00

Valida-se esta função através de simulação, confrontando-se os resultados obtidos para a resposta ao degrau do modelo não-linear, representado pelas Figuras 5.1 e 5.2, e o modelo linearizado cuja função de transferência é apresentada na Tabela 5.4. A Figura 5.9 apresenta estas simulações. Observa-se que as curvas estão sobrepostas o que significa que o modelo linearizado é uma representação fiel do modelo completo, para pequenos distúrbios.

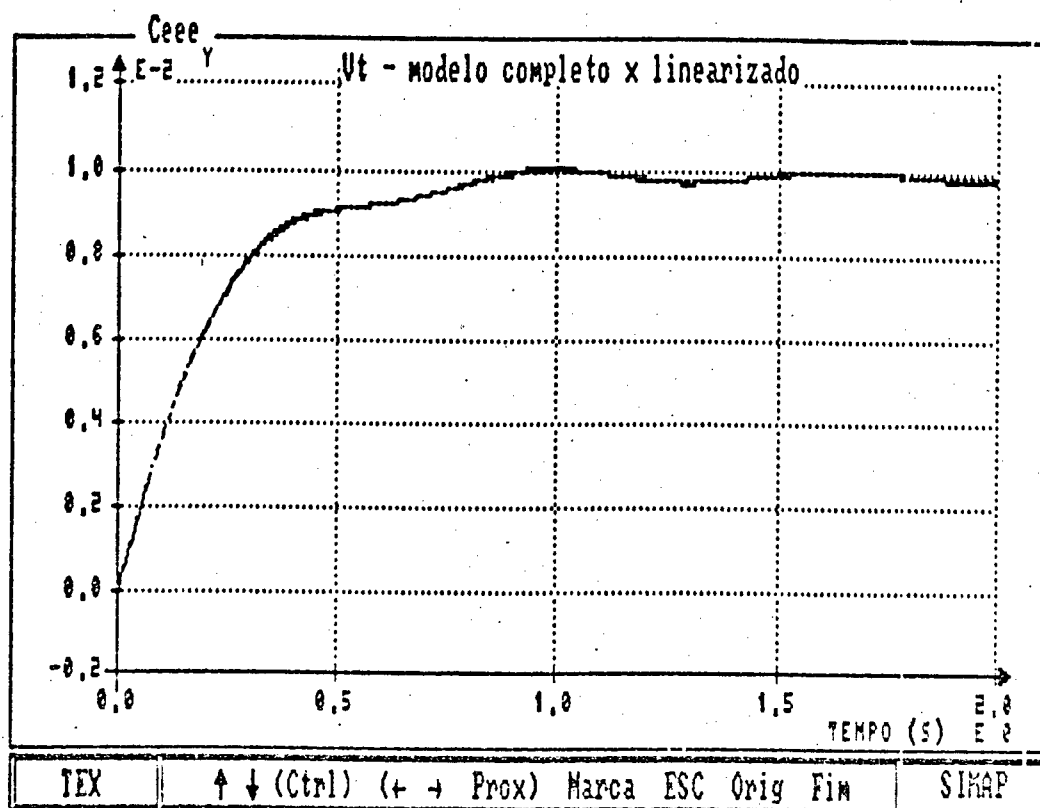


FIGURA 5.9 - Resposta ao degrau do modelo completo e linearizado.

#### - Ajuste do ESP

Alguns parâmetros do ESP têm um procedimento de ajuste bastante simples. A constante do "reset",  $T$ , é tomada de forma a garantir uma frequência de corte inferior do ESP em torno de 0,1 Hz. O ajuste de projeto,  $T = 2$  s, garante isto, pois provê uma frequência de 80 mHz. A constante de tempo do rastreador de rampa é selecionada de forma a que a frequência natural de oscilação do sistema coincida com a frequência de corte do próprio filtro [33]. Como em Itaúba a frequência natural de oscilação é de 1,6 Hz (10 rad/s) utilizou-se  $T_r = 0,1$  s.

O filtro de saída, tem uma constante de tempo,  $T_3$ , de 10 ms, necessária para atenuar ruídos de frequência mais elevada inerentes a uma instalação que possui ponte retificadora de grande porte.

O ajuste do ESP é efetuado utilizando-se a resposta em frequência da função de transferência de malha aberta  $ESP/V_{ref}$ . Obtem-se esta função através do modelo incremental seguido do algoritmo de Fadeev-Leverrier.

Valida-se esta função através do confronto das respostas ao degrau dos modelos completo e linearizado. Estas simulações são apresentadas na Figura 5.10. Nota-se que existe pequena diferença na amplitude e na frequência das curvas, porém, para todos os efeitos práticos, pode-se considerar boa a correlação entre as respostas.

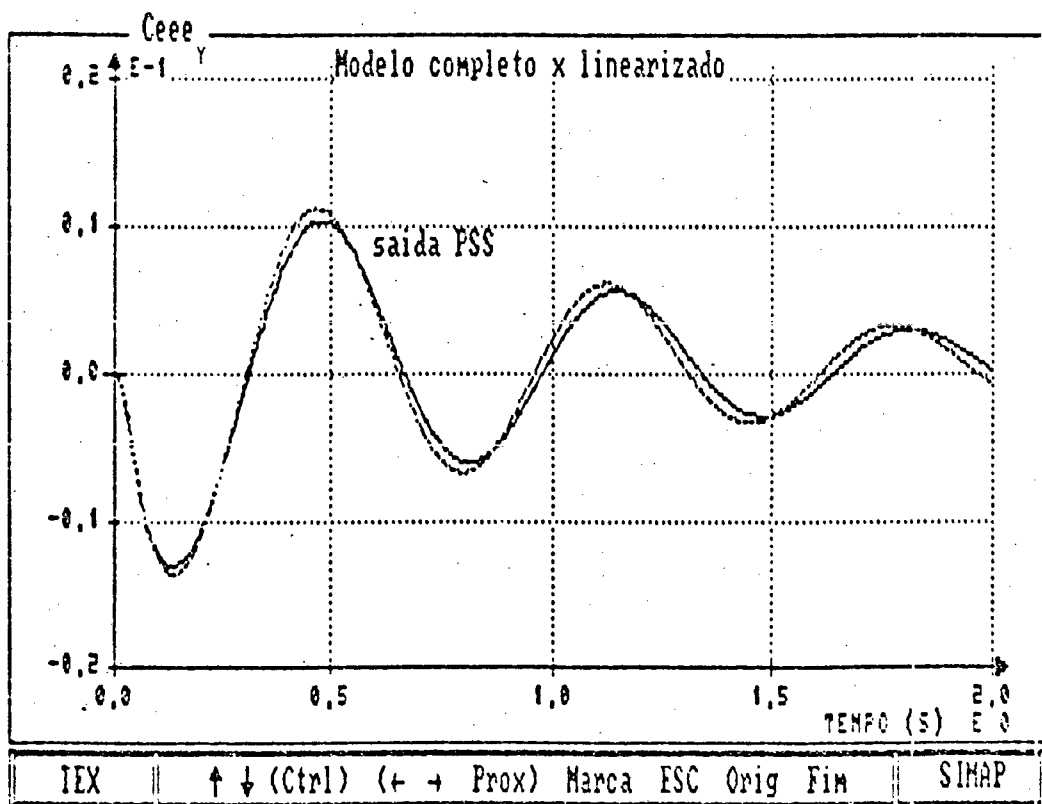


FIGURA 5.10 - Resposta ao degrau da função  $ESP/V_{ref}$ .

Da resposta em frequência da função de transferência  $V_t/V_{ref}$ , apresentada na Figura 5.11, verifica-se a fase que deve ser compensada. Na frequência natural de oscilação, 1,6 Hz [31], obtém-se o atraso de fase igual a  $-83,0^\circ$ .

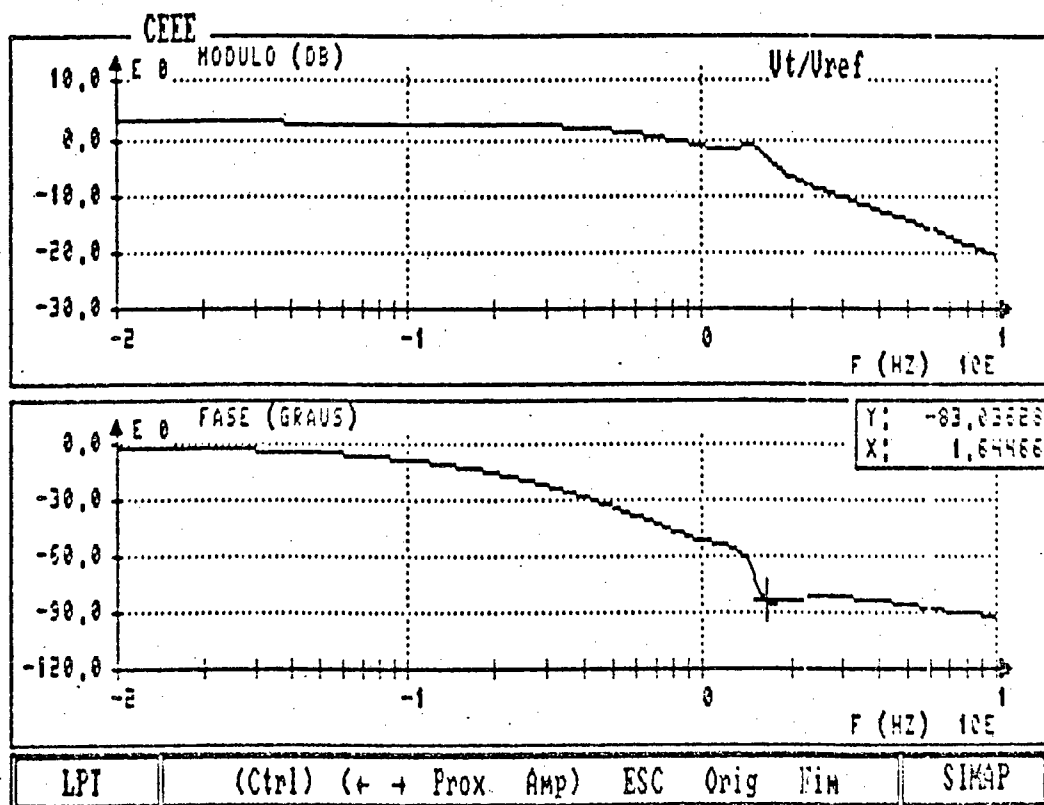


FIGURA 5.11 - Resposta em frequência da função  $V_t/V_{ref}$ .

O ganho  $K_e$  foi ajustado em torno de 10 pu/pu fornecendo assim valores de margem de fase e margem de ganho de  $108,2^\circ$  e 21,3 dB respectivamente. Tais valores, embora possam parecer excessivamente grandes, não estão em discordância com a prática em uso para este tipo de projeto. É conveniente saber que, dada a complexidade do SEP, e a sua característica variável, em outras condições de despacho e configuração estas figuras de mérito poderão ser naturalmente diminuídas.

Considerando-se a estrutura proposta para o compensador e os ajustes colocados no campo,  $T1=0,127$  e  $T2=0,018$ , constata-se que tal fase foi adequadamente compensada.

Os diagramas de Bode da função de transferência  $ESP/V_{ref}$ , após o ajuste do compensador, são apresentados na Figura 5.12.

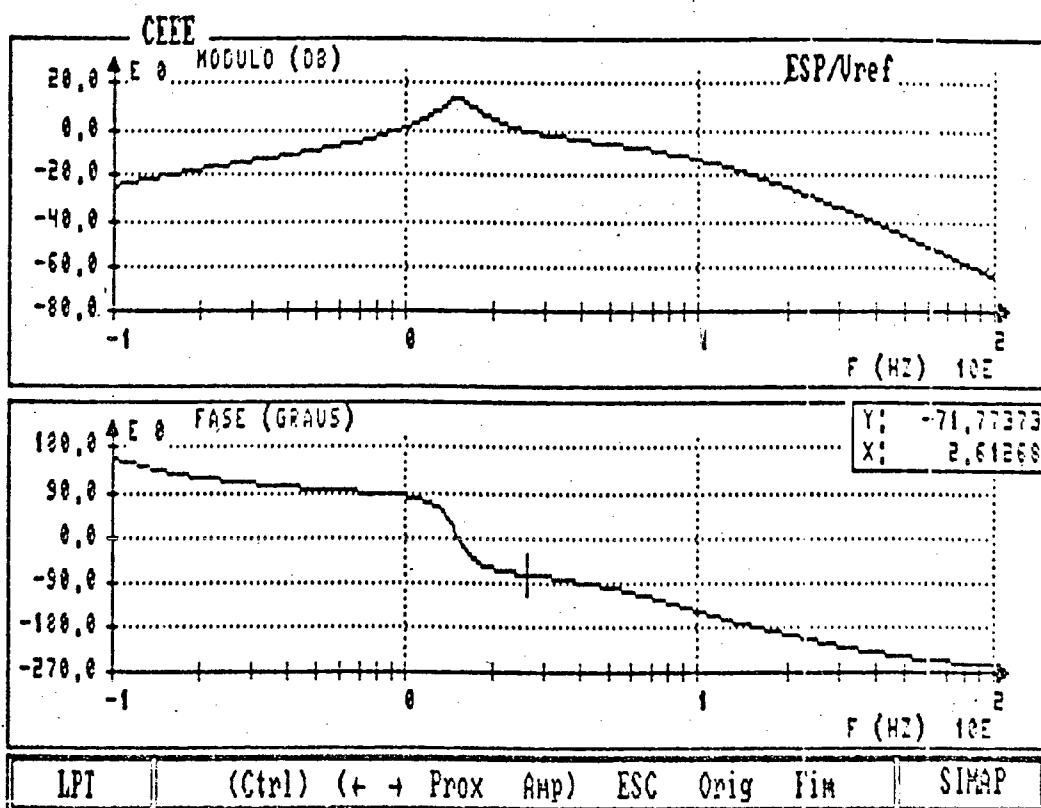


FIGURA 5.12 - Resposta em frequência de  $ESP/V_{ref}$ .

O ajuste do limitador é efetuado de forma a evitar que a ação do ESP provoque modulação excessiva na tensão terminal da máquina, durante contingências mais severas. Os limites de  $\pm 10\%$  são tradicionalmente utilizados.

Obteve-se o ajuste final do ESP, apresentado na Figura 5.13, por refinamento dos ajustes através de simulações.

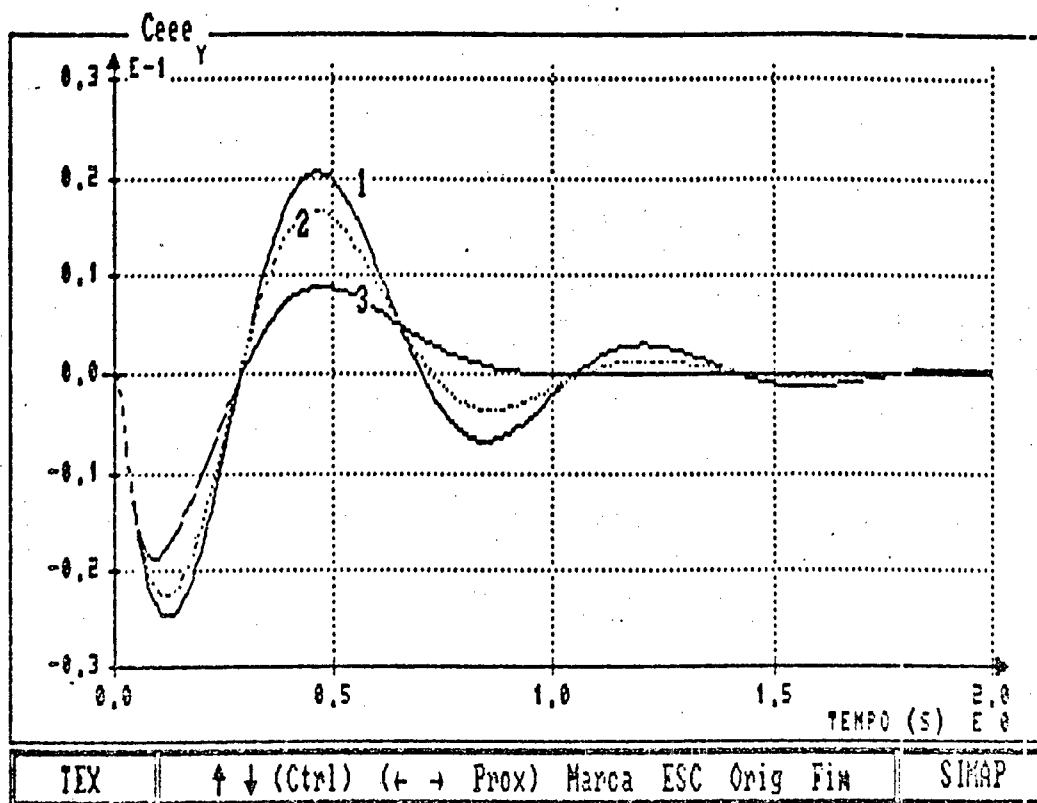


FIGURA 5.13 - Resposta ao degrau.

## 5.5 - Simulações

Após a definição dos ajustes do ESP, analisou-se o comportamento do ESP em tomadas de carga, resposta ao degrau sob diversas condições de carga e variação da reatância externa.

### 5.5.1 - Resposta ao degrau com variação paramétrica

Efetuu-se a análise do comportamento do ESP, através de simulação, para alguns valores do ganho  $K_e$  e das constantes do compensador  $T_1$  e  $T_2$ . A Tabela 5.5 apresenta os valores testados para estes parâmetros. A Figura 5.13 apresenta a curva da potência elétrica resultante da resposta ao degrau aplicado na

referência do controlador de tensão, com o ESP operando. Foram adotados os valores correspondentes à curva número 3.

Para análise do comportamento do gerador com ESP sob diversas condições do sistema variou-se a reatância externa ( $x_e$ ) e simulou-se a resposta ao degrau na referência, utilizando o modelo completo com os ajustes definidos anteriormente.

A Tabela 5.5 apresenta as condições simuladas e as Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam o comportamento da potência elétrica após a aplicação de um degrau na referência do controlador. O degrau é aplicado no instante  $t=0$  com o ESP conectado e é retirado em  $t=2$  s, após o ESP ser desconectado.

TABELA 5.5 - Simulações com variação paramétrica.

Figura	$x_e$ (pu)	curva	$K_e$	$T_1$	$T_2$
5.13	0,1971	1	3,00	0,150	0,014
		2	5,04	0,127	0,012
		3	10,00	0,127	0,018
5.14	0,1971		10,00	0,127	0,018
5.15	0,3000		10,00	0,127	0,018
5.16	0,6000		10,00	0,127	0,018



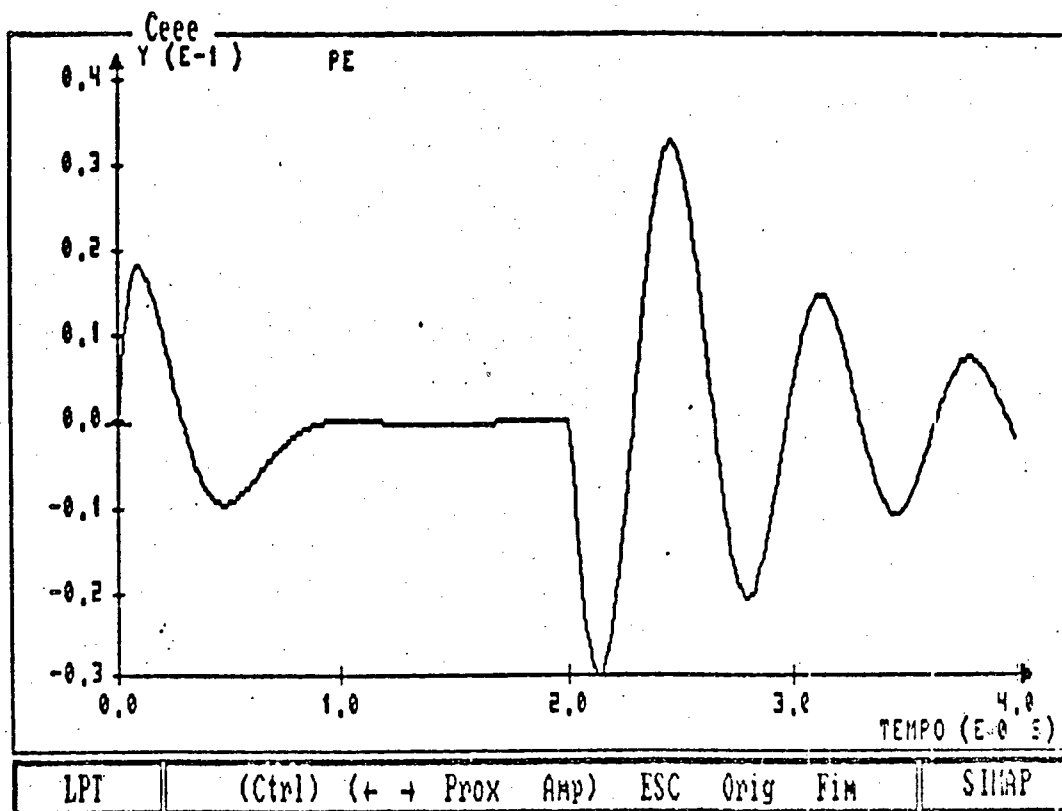


FIGURA 5.14 - Resposta ao degrau.

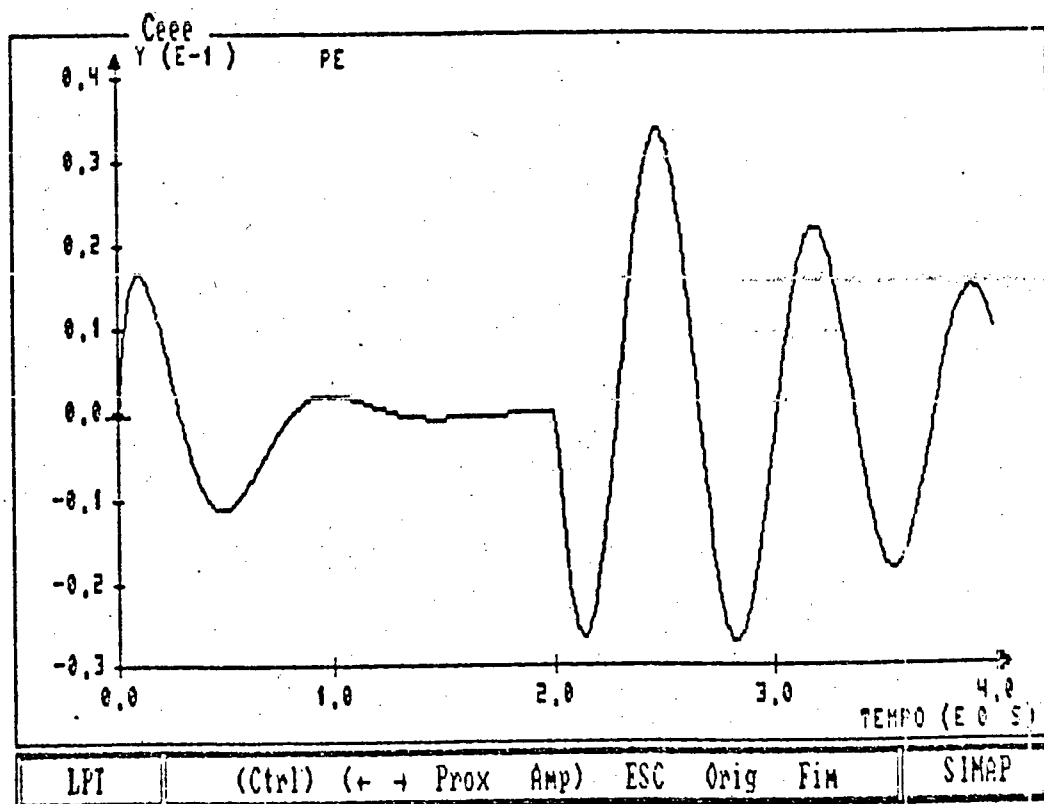


FIGURA 5.15 - Resposta ao degrau.

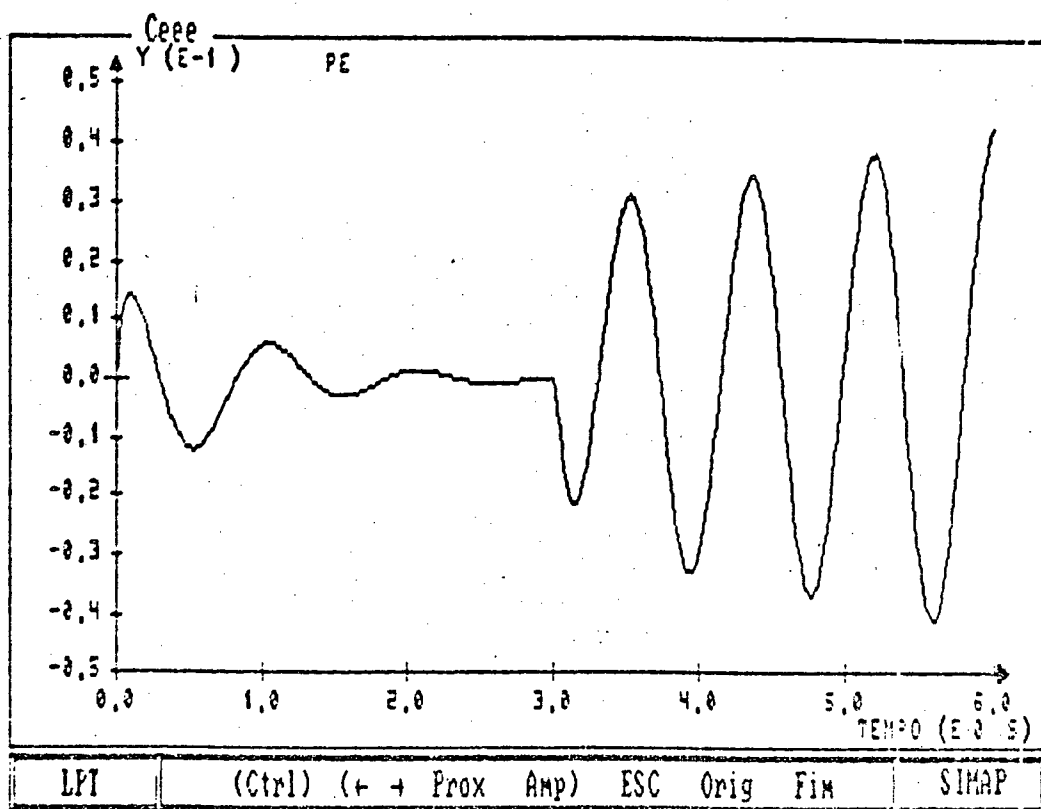


FIGURA 5.16 - Resposta ao degrau.

Verifica-se que o aumento da reatância externa provoca tal degradação do amortecimento natural do sistema que torna-o instável como mostra a Figura 5.16. O ESP, porém, provê substancial amortecimento adicional e, mesmo para esta última condição, torna o sistema estável.

### 5.5.2 - Resposta ao degrau com variação de carga

Para verificar a robustez do ESP sob diversas condições de carga simulou-se a resposta ao degrau na referência, utilizando o modelo completo, sob diversas condições de carga.

A Tabela 5.6 apresenta as condições de carga utilizadas nas simulações efetuadas.

TABELA 5.6 - Resposta ao degrau sob diversas condições de carga.

FIG.	Pe (MW)	Q (MVAR)
5.17	120	0
5.18	120	50
5.19	120	-50
5.20	75	0
5.21	75	50
5.22	75	-50

As Figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22 apresentam as curvas da tensão terminal e da potência elétrica nos gráficos superior e inferior respectivamente. Estas curvas apresentam a resposta ao degrau na referência do controlador. O degrau é aplicado no instante  $t=0$  s com o ESP operando e é retirado no instante  $t=2$  s com o ESP bloqueado. Verifica-se, através das simulações, o bom desempenho do ESP sob diversas condições de carga da máquina. A potência elétrica é bastante amortecida e a tensão terminal é pouco influenciada pela ação do ESP.

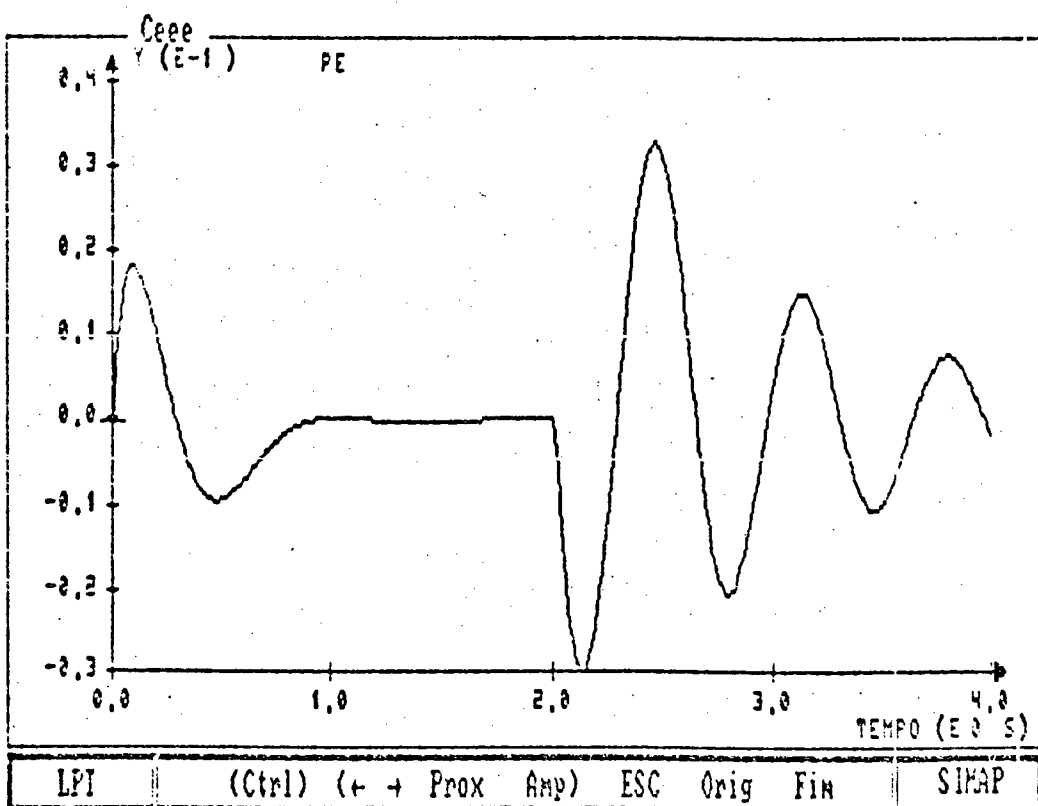
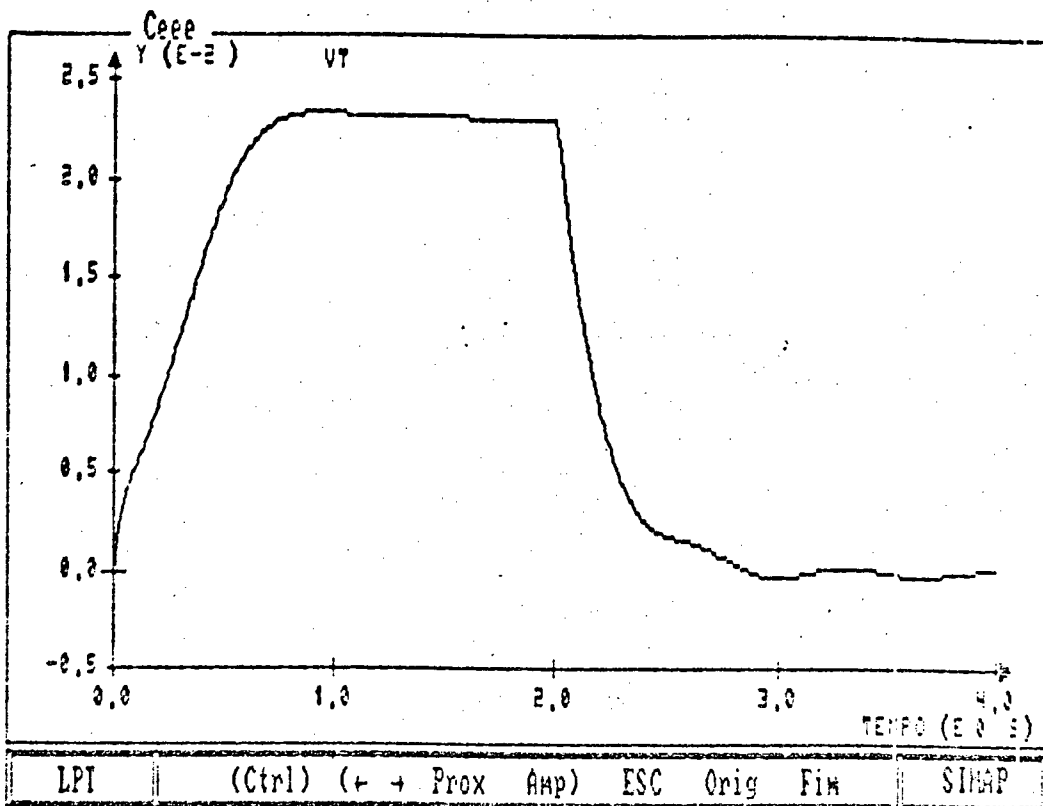


FIGURA 5.17 - Resposta ao degrau,  $P_e=120$  MW,  $Q=0$  MVAR.

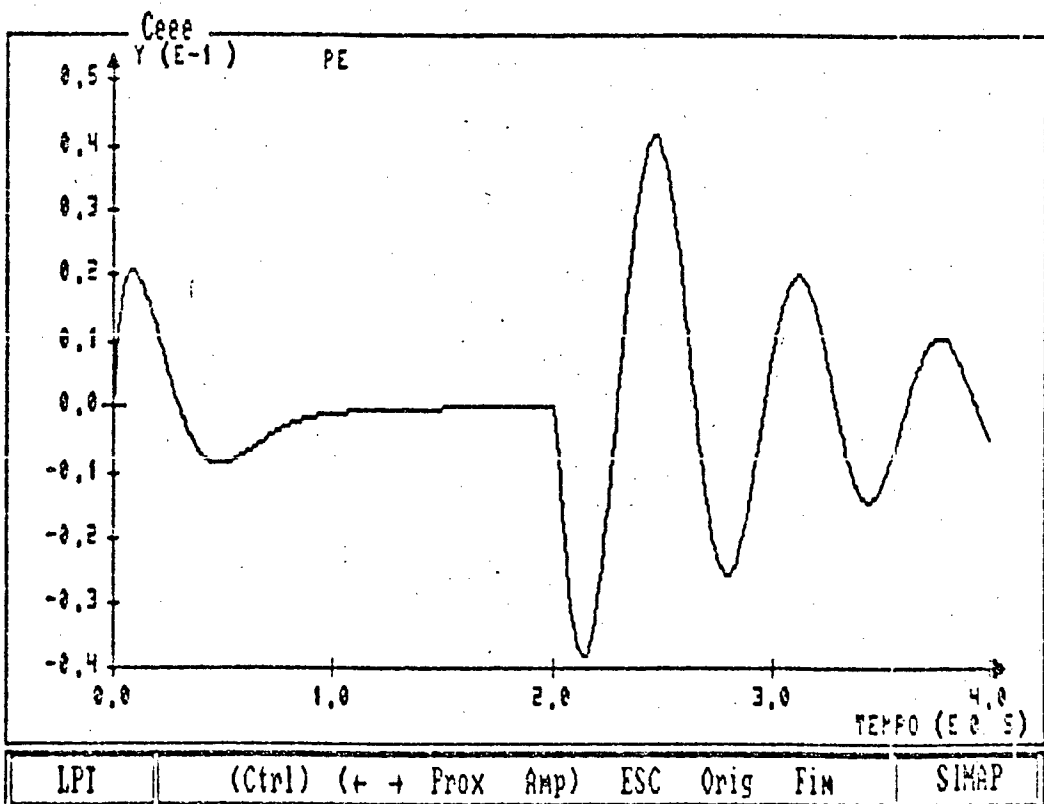
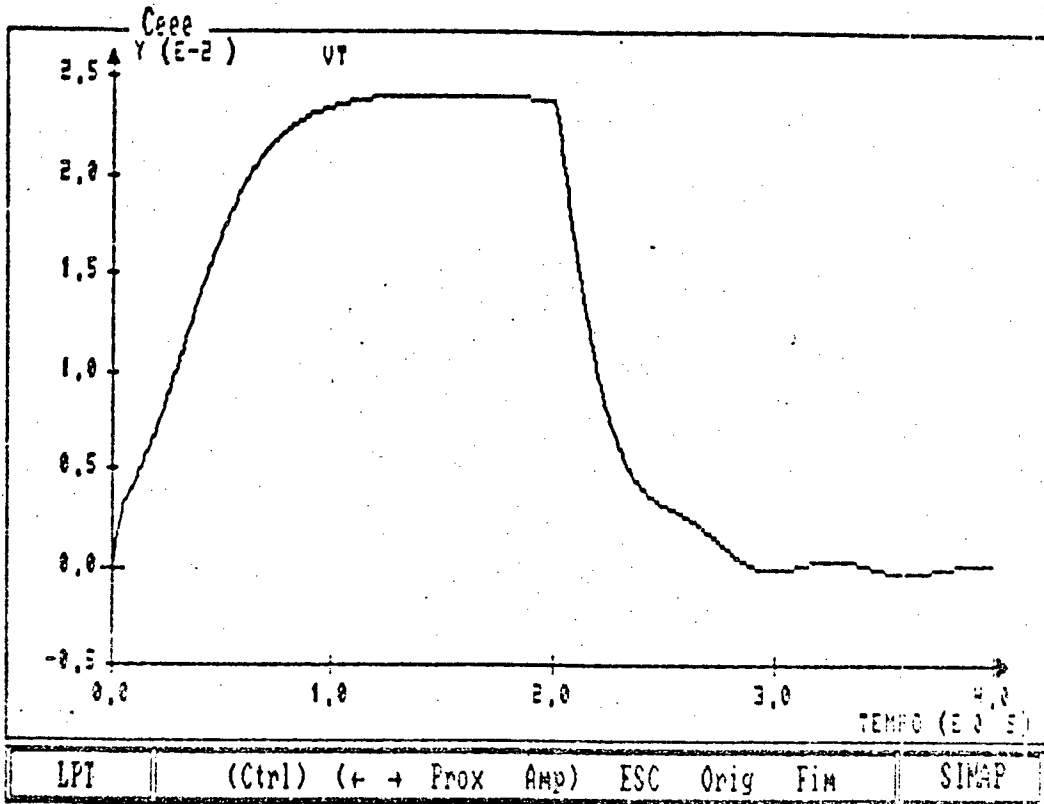


FIGURA 5.18 - Resposta ao degrau,  $P_e=120$  MW,  $Q=50$  MVAR.

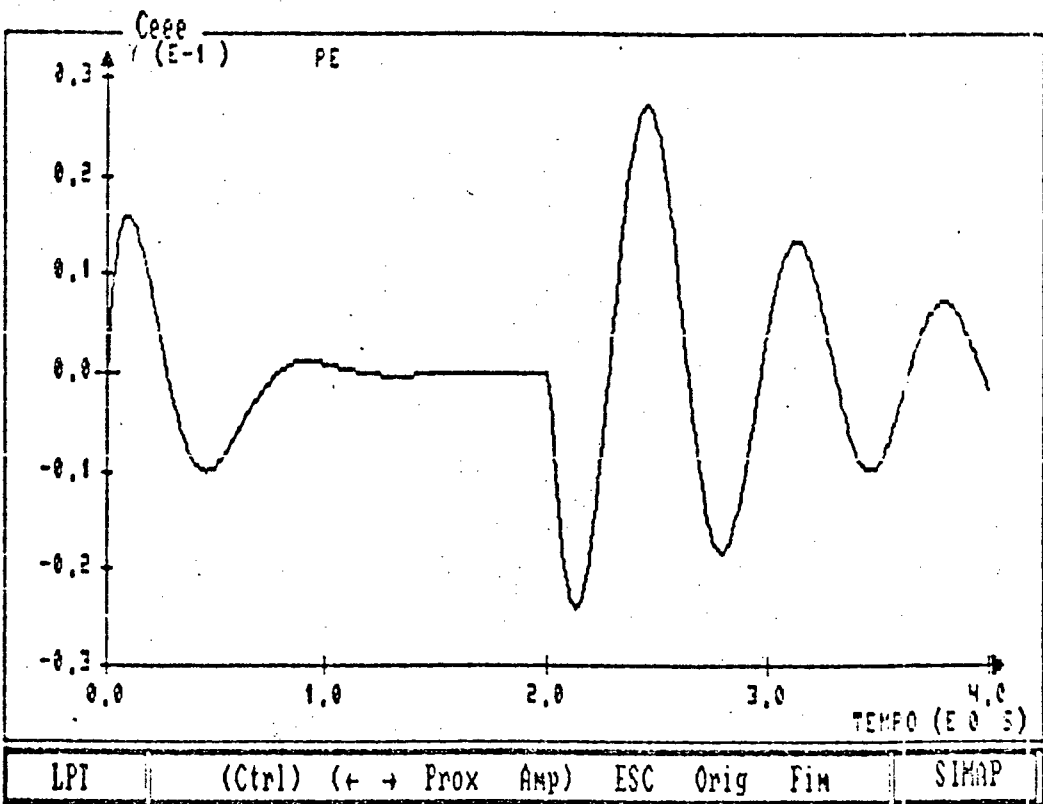
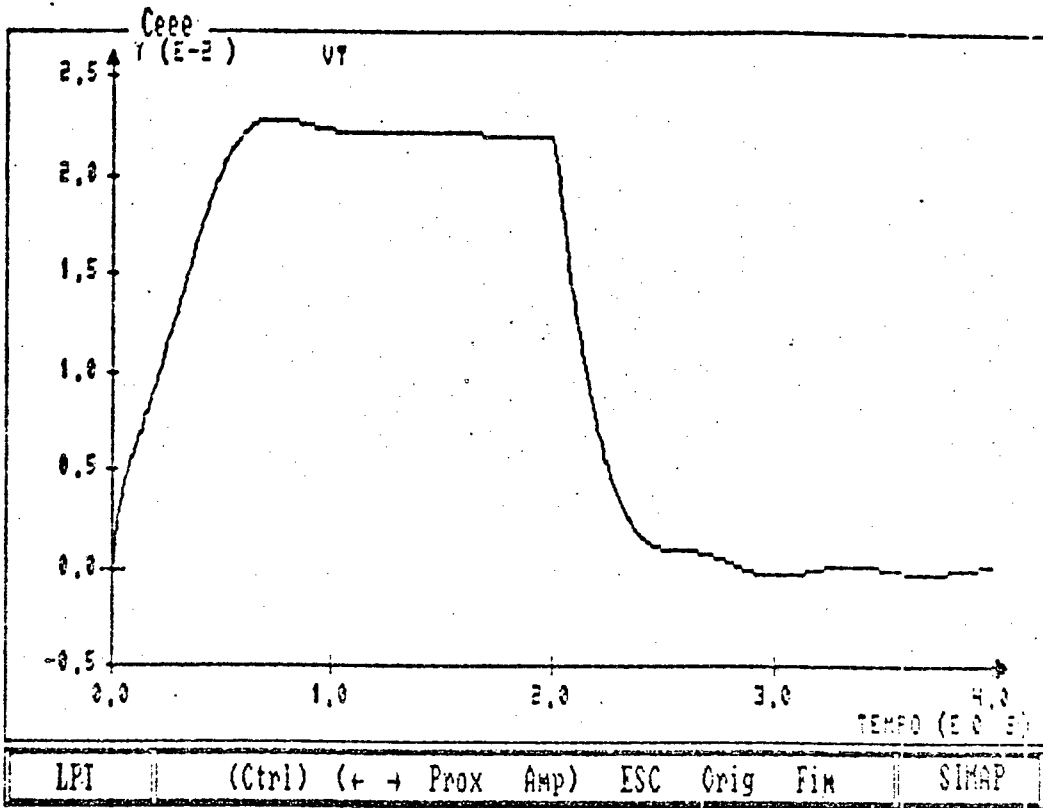


FIGURA 5.19 - Resposta ao degrau,  $P_e=120$  MW,  $Q=-50$  MVAR.

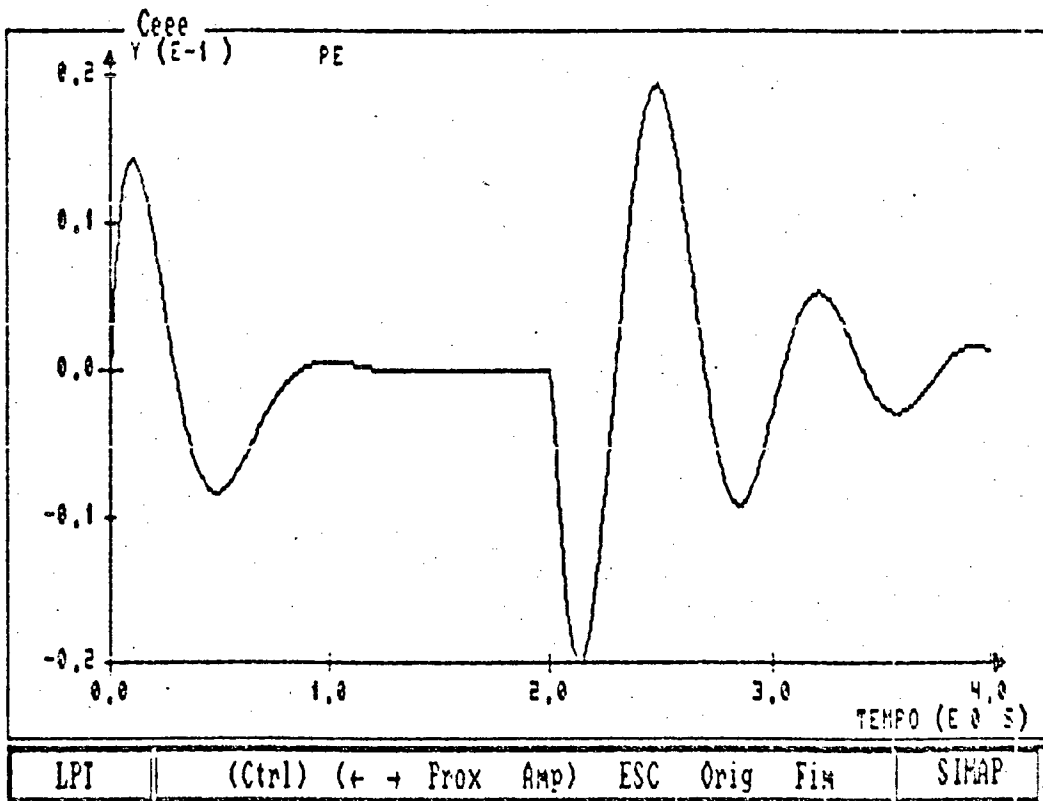
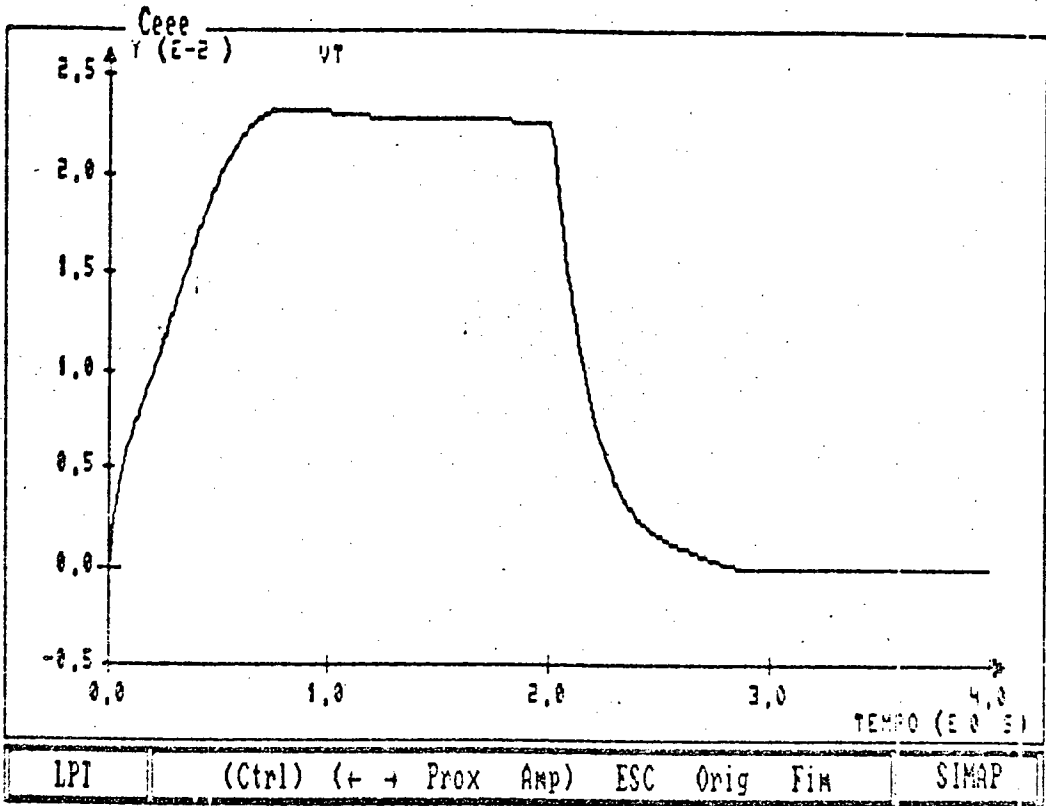


FIGURA 5.20 - Resposta ao degrau,  $P_e=75$  MW,  $Q=0$  MVAR.

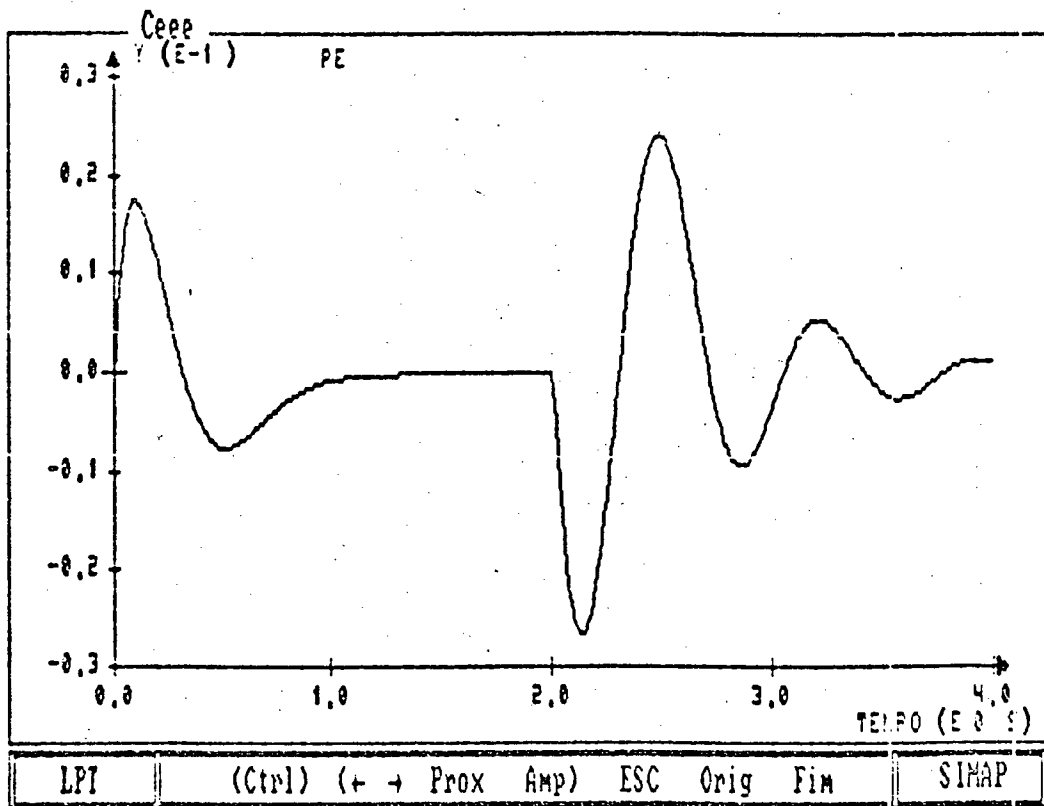
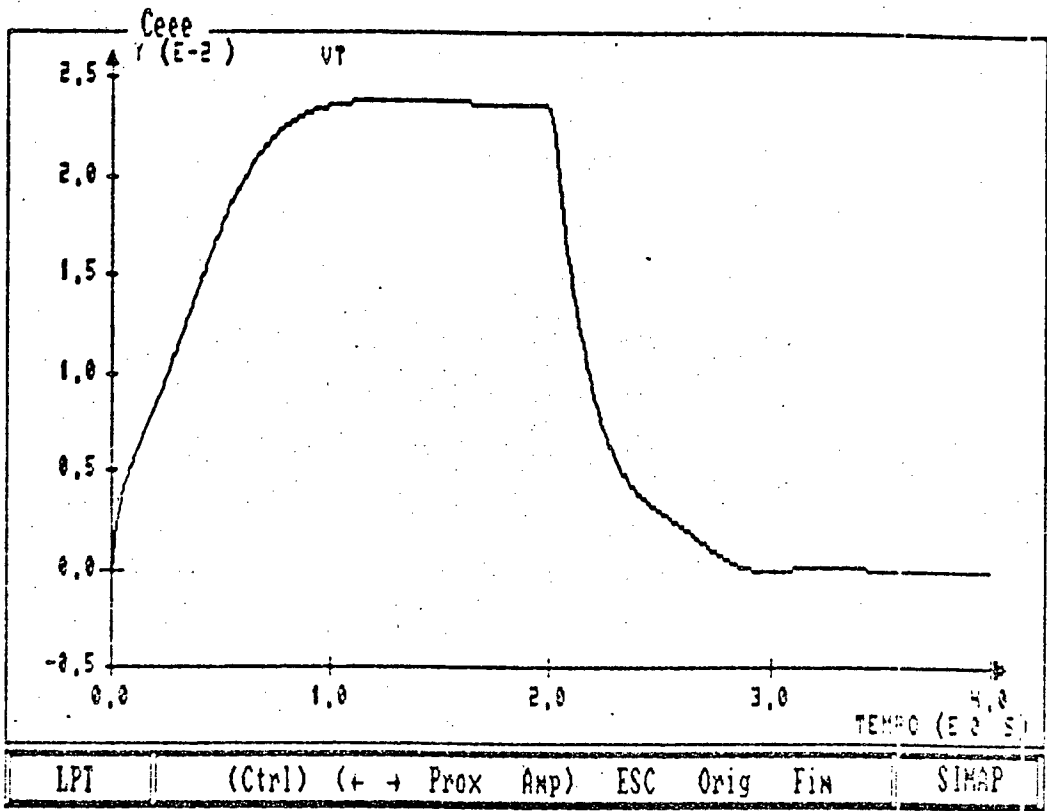


FIGURA 5.21 - Resposta ao degrau, Pe=75 MW, Q=50 MVAR.



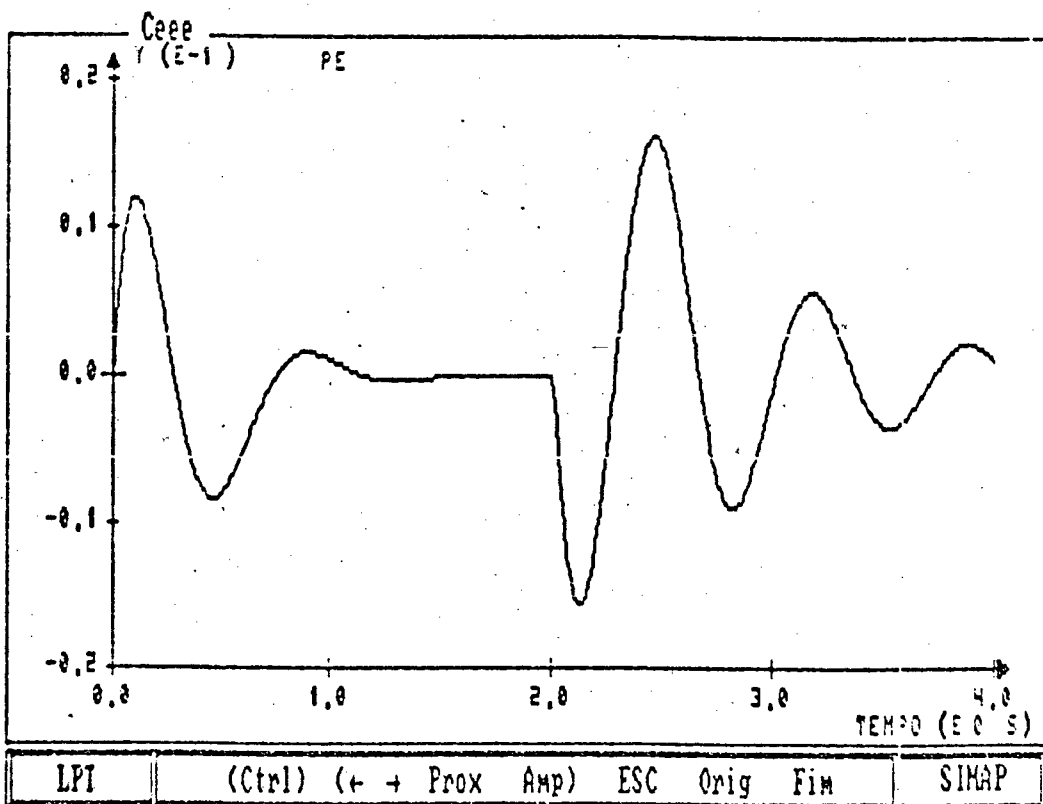
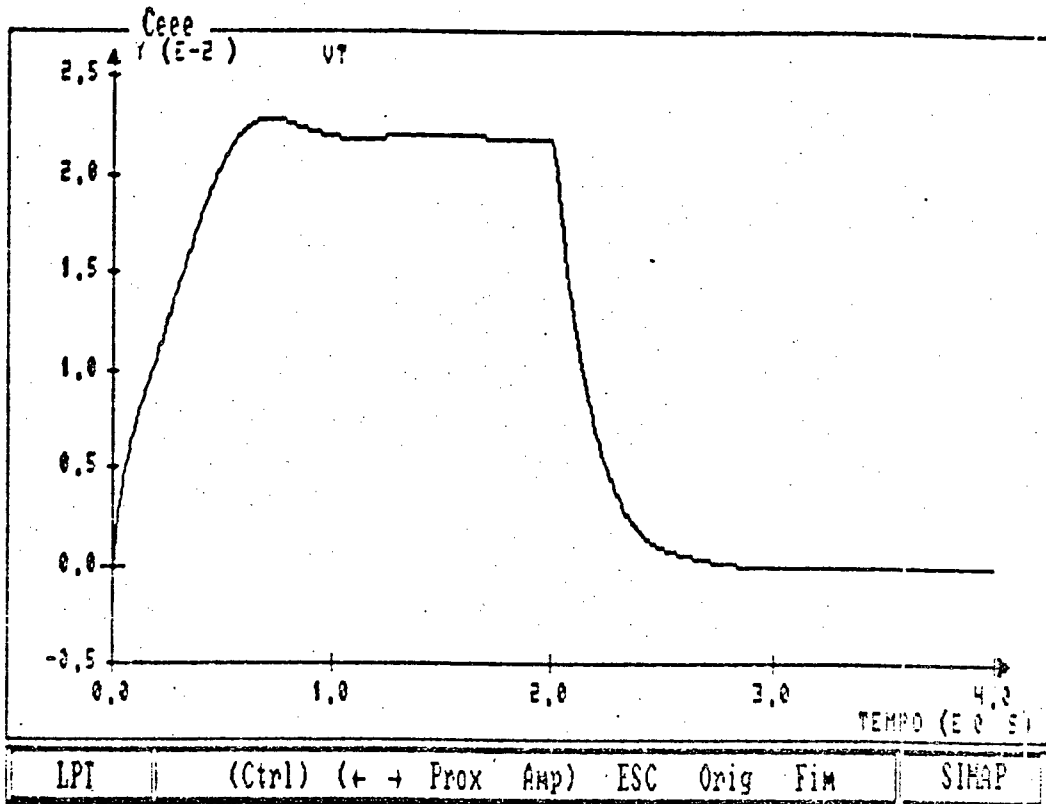


FIGURA 5.22 - Resposta ao degrau,  $P_e=75$  MW,  $Q=-50$  MVAR.

### 5.5.3 - Tomada de carga

Para verificar o comportamento da corrente reativa simulou-se uma tomada de carga.

A Figura 5.23 apresenta a potência ativa na tomada de carga enquanto a Figura 5.24 apresenta a corrente reativa.

Nota-se a baixa sensibilidade da corrente reativa com relação à potência mecânica.

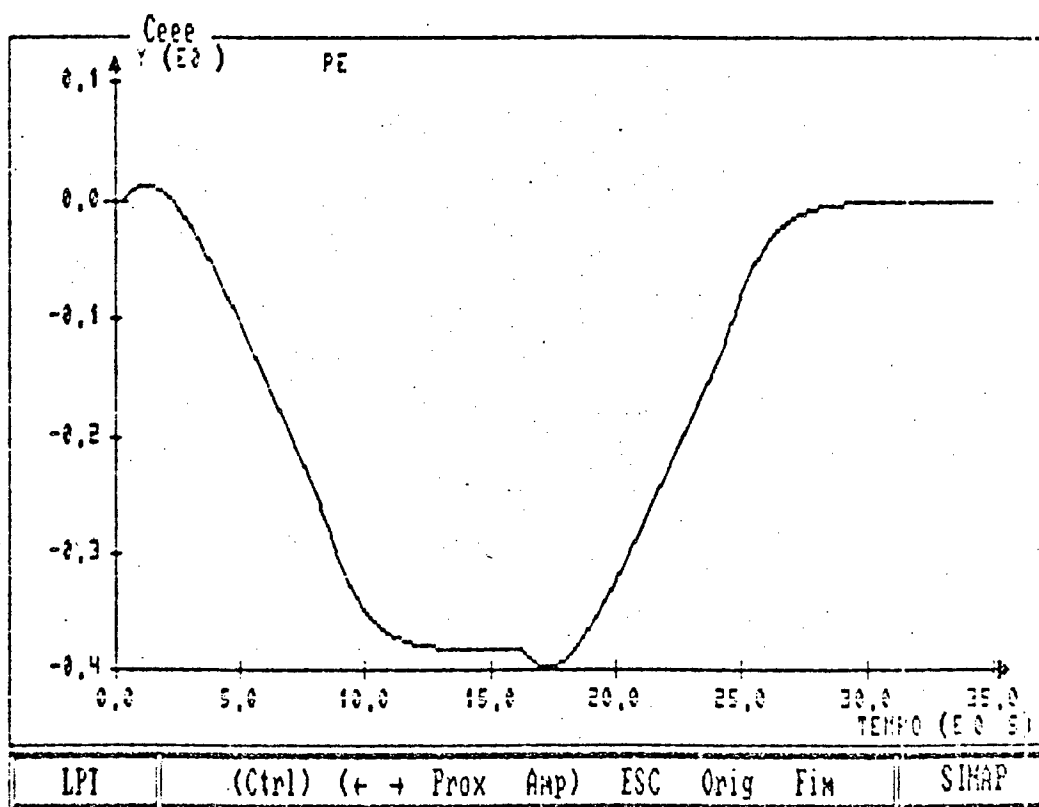


FIGURA 5.23 - Tomada de carga - potência ativa.

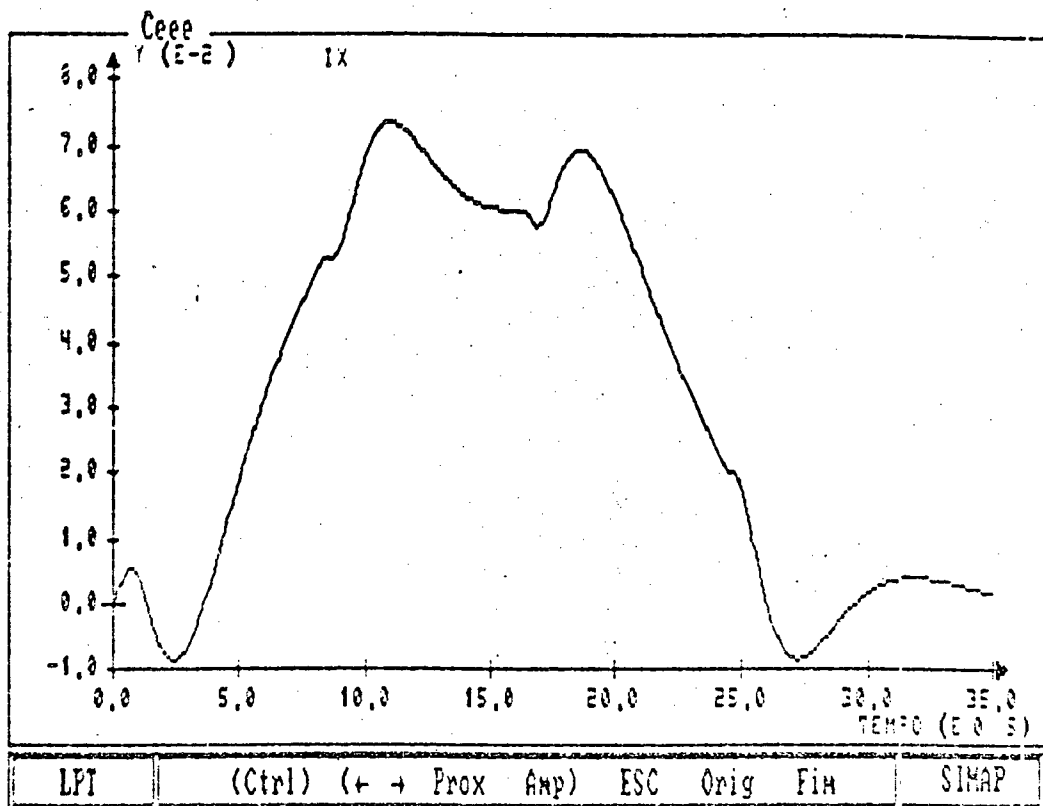


FIGURA 5.24 - Tomada de carga - corrente reativa.

## 5.6 - Ensaio de campo

Apresentam-se a seguir os registros oscilográficos efetuados durante a realização dos ensaios de campo. Com estes registros validam-se as simulações executadas.

### 5.6.1 - Resposta ao degrau com variação paramétrica

Para analisar o comportamento do ESP, sob diversos ajustes dos seus parâmetros, foram realizados ensaios de resposta ao degrau. As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam os oscilogramas das respostas obtidas para os valores de  $K_e$ ,  $T_1$  e  $T_2$  definidos na Tabela 5.7. Estes ensaios foram realizados nas se-

guintes condições de carga:  $P_e=120$  MW e  $Q=0$  MVAR. As grandezas registradas estão identificadas nas Figuras.

TABELA 5.7 - Resposta ao degrau com variações dos ajustes.

FIG.	$K_e$	$T_1$	$T_2$
5.25	3,00	0,150	0,014
5.26	5,04	0,127	0,012
5.27	10,00	0,127	0,018

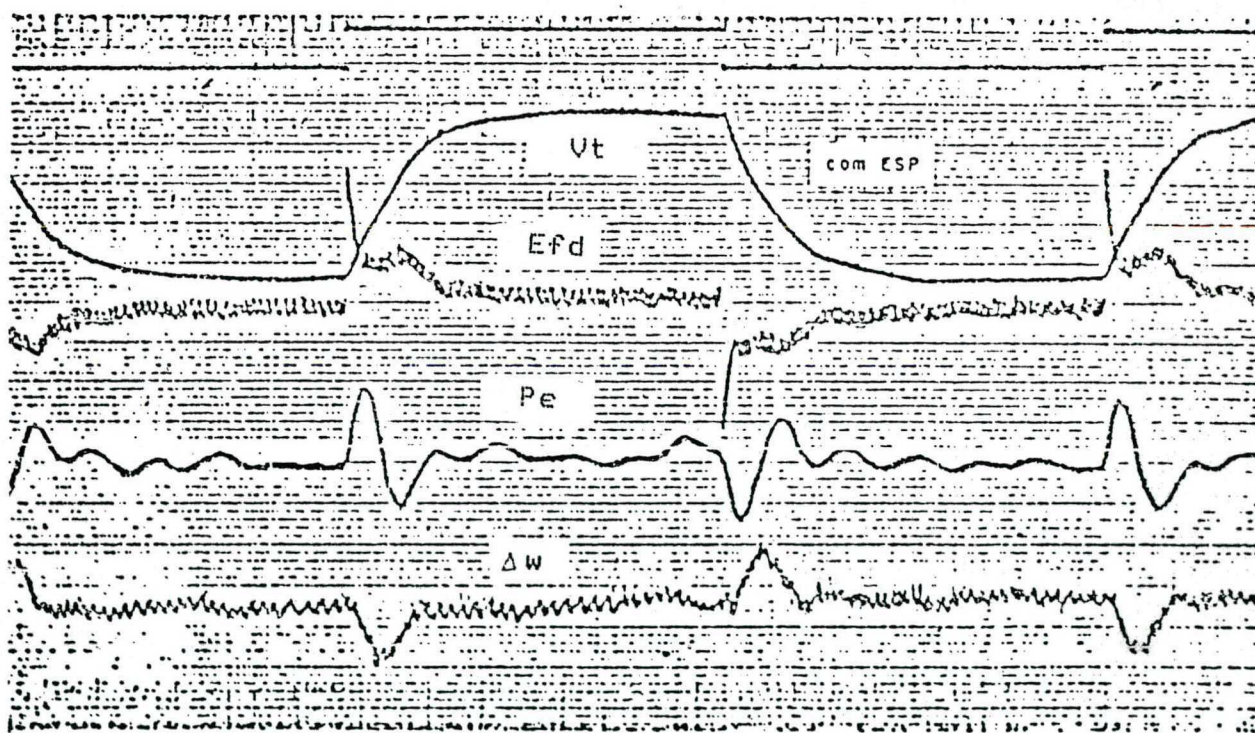


FIGURA 5.25 - Resposta ao degrau.  $P_e=120$  MW,  $Q=0$  MVAR.



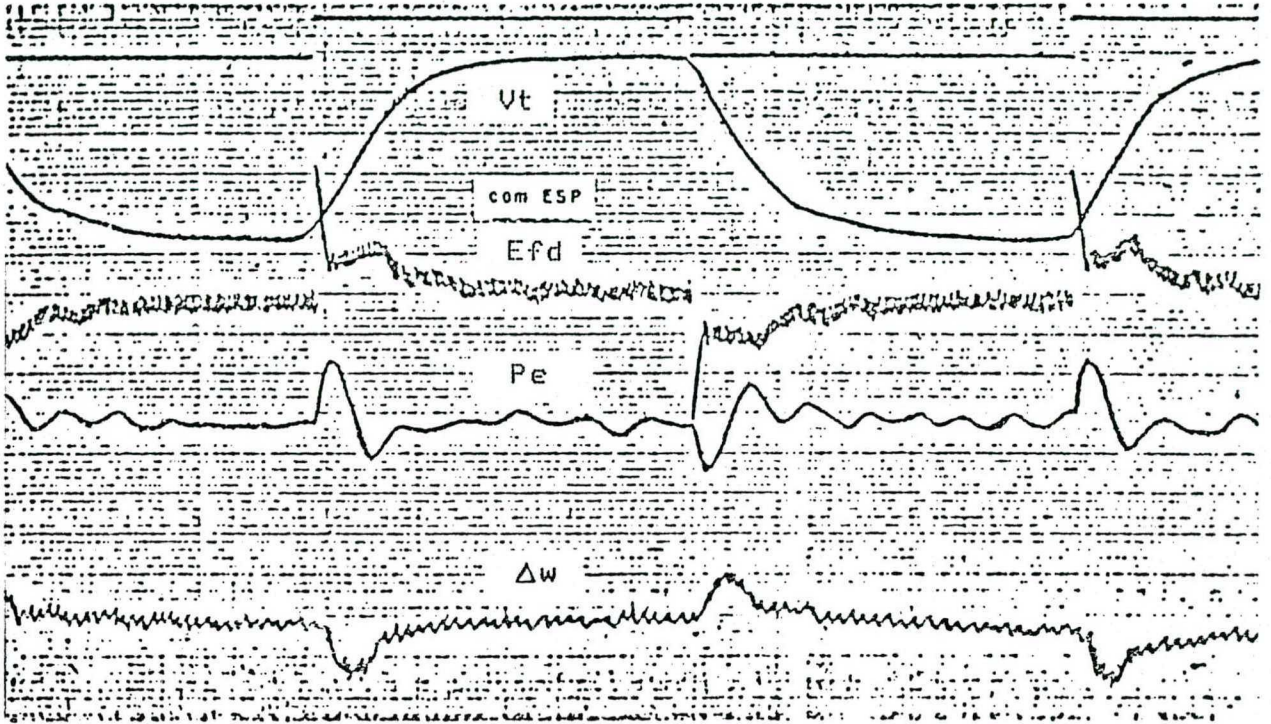


FIGURA 5.26 - Resposta ao degrau.  $P_e=120$  MW,  $Q=0$  MVAR.

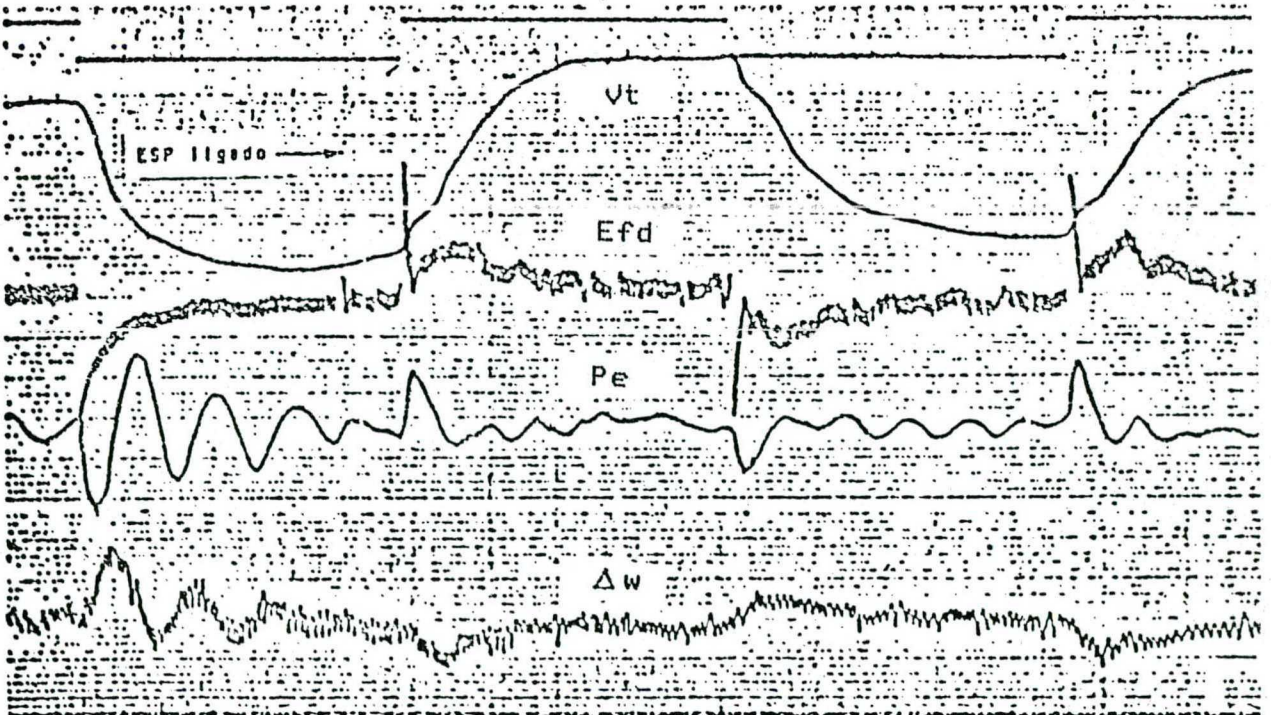


FIGURA 5.27 - Resposta ao degrau.  $P_e=120$  MW,  $Q=0$  MVAR.

### 5.6.2 - Resposta ao degrau com variação de carga

Para analisar o comportamento do ESP sob diversas condições de carga efetuaram-se ensaios de resposta ao degrau onde foram registrados os comportamentos das principais grandezas da máquina com e sem a atuação do ESP. A Tabela 5.8 apresenta as condições de carga em que foram realizados estes ensaios.

TABELA 5.8 - Resposta ao degrau sob diversas condições de carga.

FIG.	Pe (MW)	Q (MVAR)
5.28	120	0
5.29	120	50
5.30	120	-50
5.31	75	0
5.32	75	50
5.33	75	-50



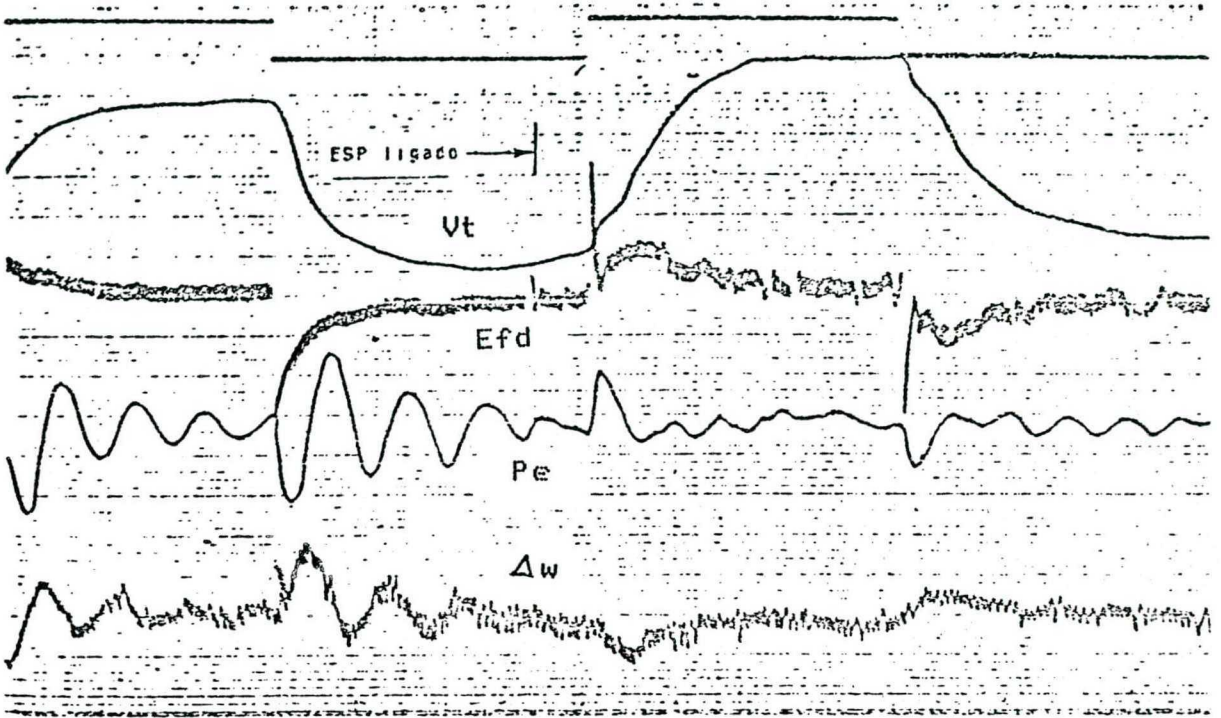


FIGURA 5.28 - Resposta ao degrau.

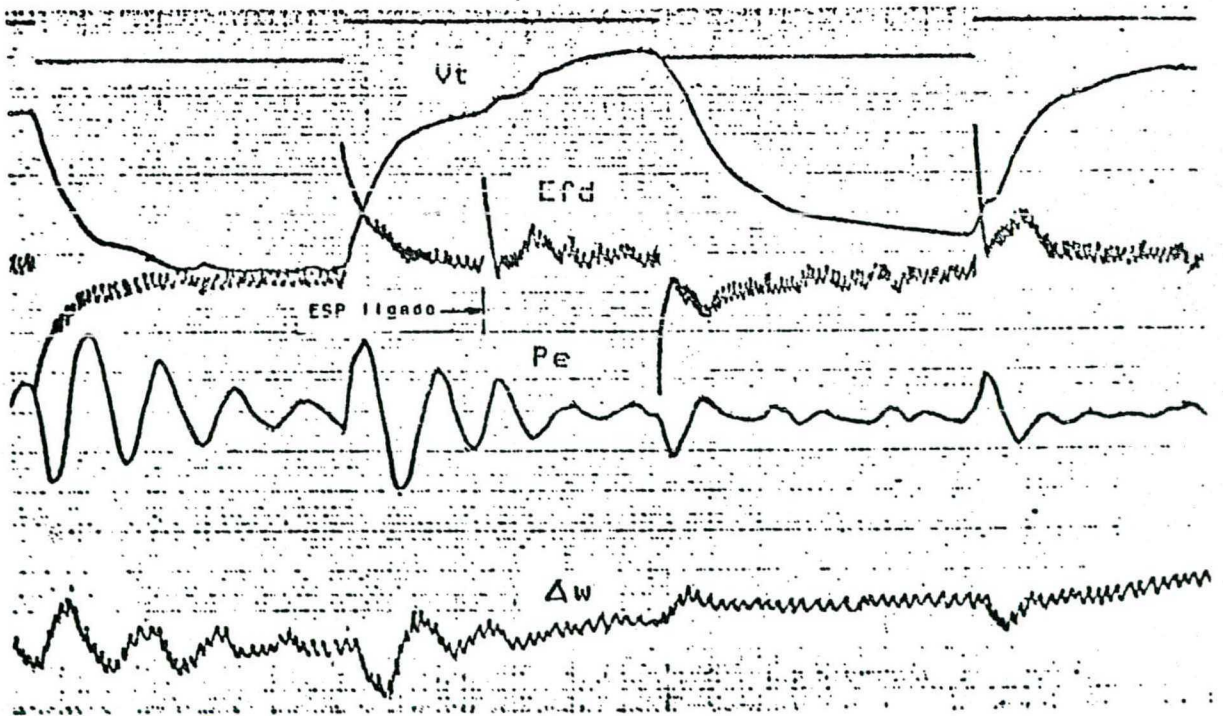


FIGURA 5.29 - Resposta ao degrau.

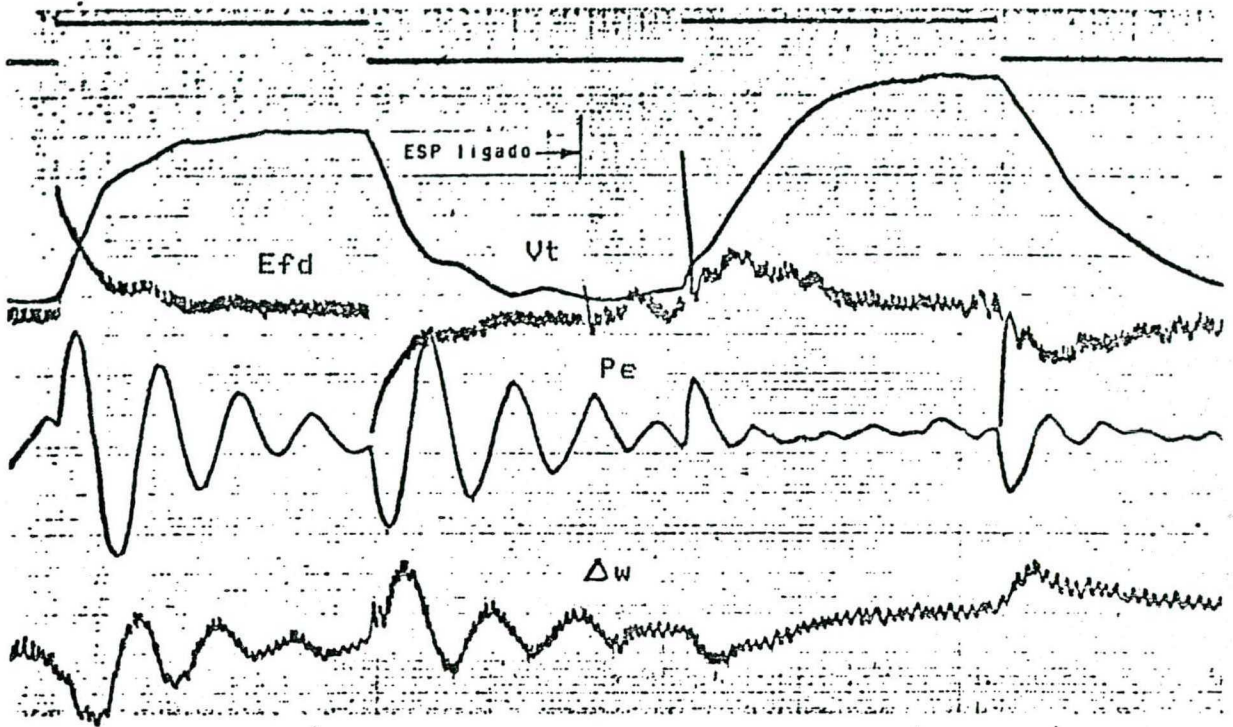


FIGURA 5.30 - Resposta ao degrau.

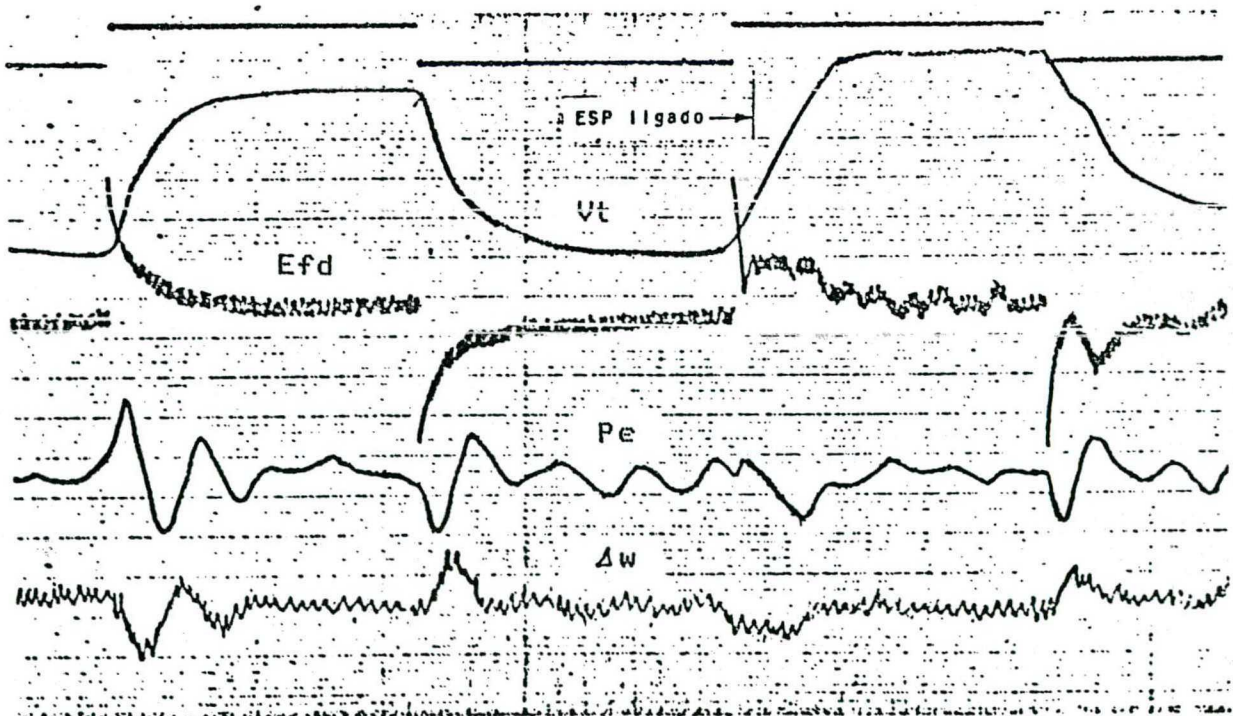


FIGURA 5.31 - Resposta ao degrau.



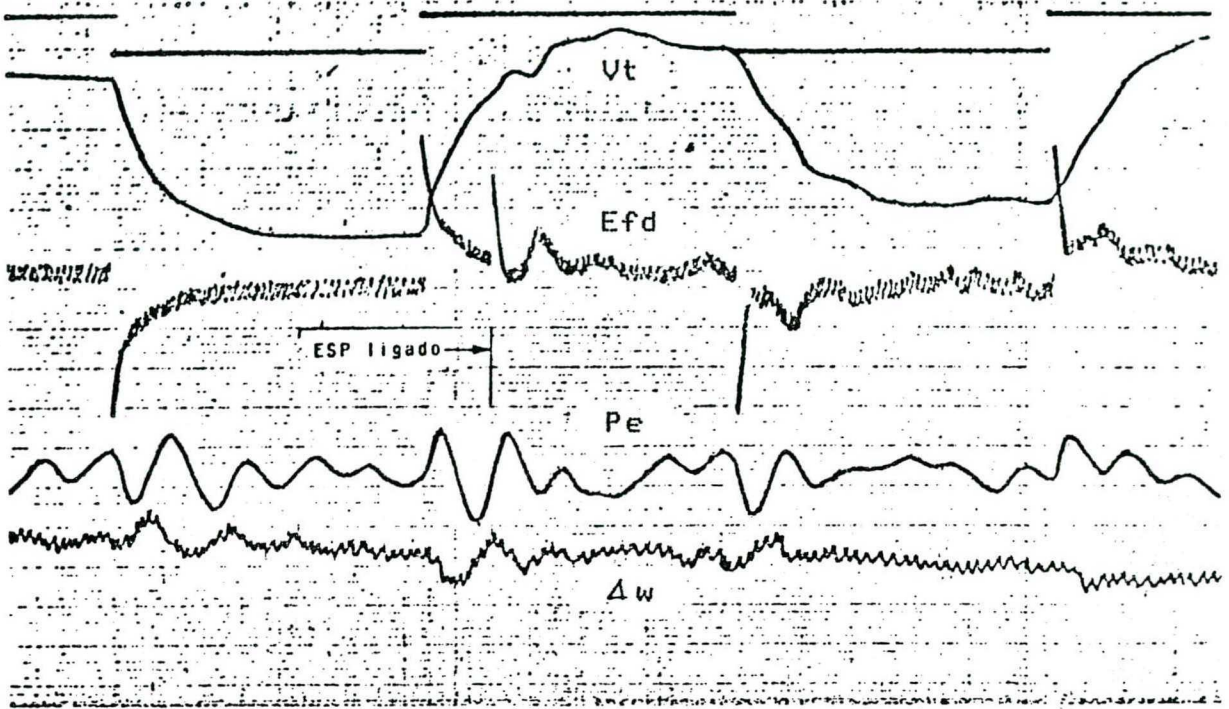


FIGURA 5.32 - Resposta ao degrau.

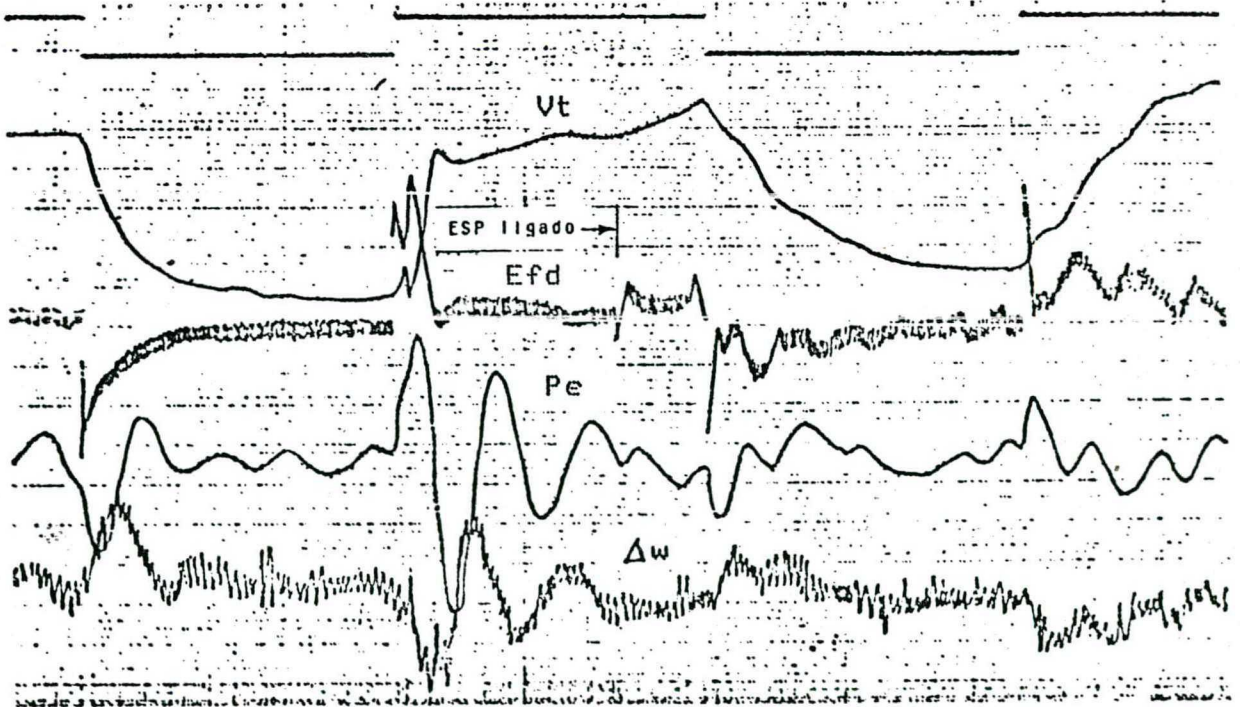


FIGURA 5.33 - Resposta ao degrau.

### 5.6.3 - Tomada de carga

A Figura 5.34 apresenta o oscilograma da tomada de carga do gerador. Verifica-se que é pequena a variação da corrente reativa.

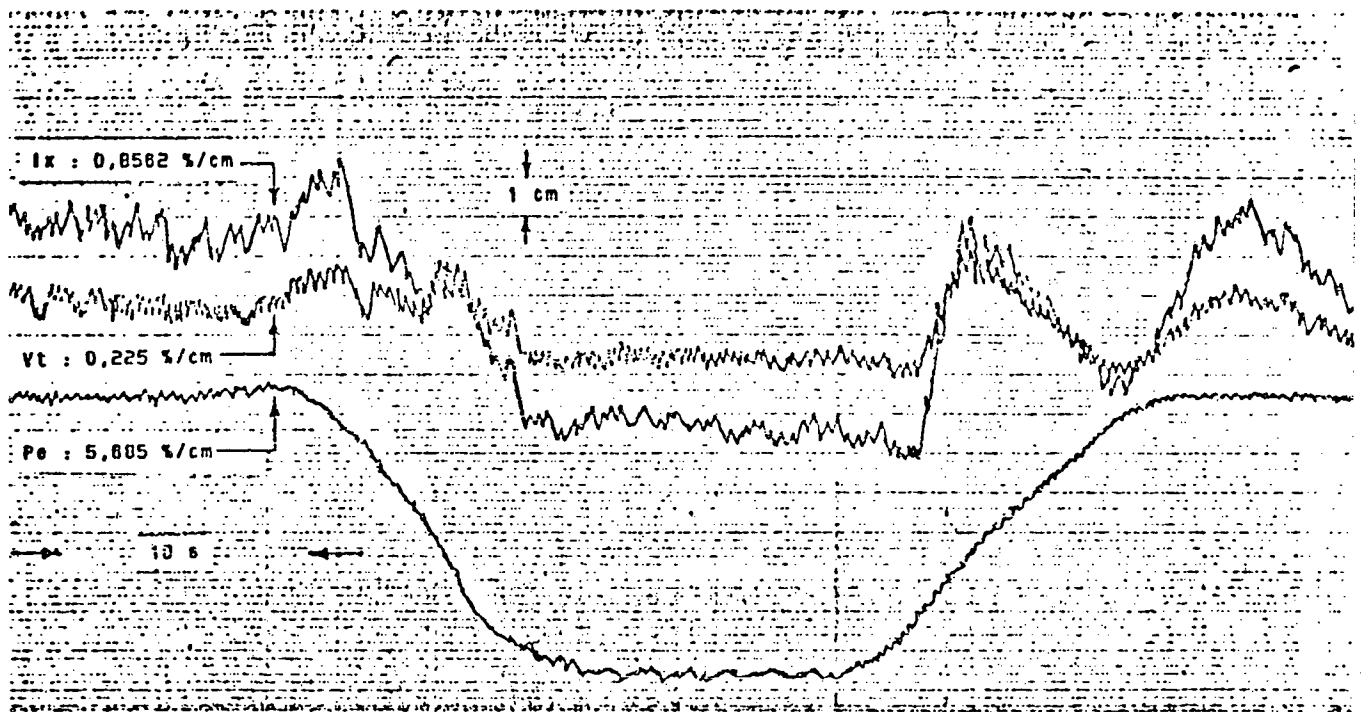


FIGURA 5.34 - Tomada de carga ativa.

### 5.6 - Confronto entre simulações e ensaios

Verifica-se que os oscilogramas confirmam plenamente os resultados obtidos através de simulação apesar da dificuldade para efetuar-se esta comparação devido, principalmente, a diferença de escala entre ambos e também a presença de ruído nos oscilogramas.

No entanto, as medidas de frequência de oscilação, valores máximos e mínimos observados nas oscilações de potência

elétrica e mesmo a forma de onda dos sinais demonstram uma grande correlação com as simulações.

O comportamento do ESP, nas diferentes condições de carga a que foi submetido, mostrou robustez suficiente para garantir o desempenho desejado em larga faixa de operação da unidade geradora.

### 5.7 - Conclusões

Apresentou-se as diversas etapas do projeto do ESP da usina hidrelétrica de Itaúba ressaltando-se as facilidades providas pelo SIMAP. Comparou-se os resultados obtidos com aqueles do projeto original e verificou-se que os mesmos são plenamente satisfatórios.

Pôde-se testar, em um problema real, diversos algoritmos do programa e constatou-se, desta maneira, o bom desempenho dos mesmos e a facilidade no desenvolvimento de projetos desta natureza.

Destaca-se o bom desempenho dos algoritmos de identificação mesmo utilizando-se poucos pontos de entrada e poucas casas decimais para sua representação. Ressalta-se a possibilidade de validação destes algoritmos, identificação freqüencial e temporal, através da resposta em freqüência e simulação respectivamente. Isto é importante pois resulta em maior confiabilidade dos resultados obtidos.

O algoritmo do modelo incremental mostrou-se muito útil, especialmente quando se tem projetos envolvendo modelos não-lineares e multivariáveis. Este algoritmo, associado ao mé-

todo de Fadeev-Leverrier, permite que sejam utilizadas as ferramentas clássicas de análise e projeto.

Mostrou-se a importância da simulação de modelos não-lineares e multivariáveis no refinamento de ajustes, análise paramétrica, validação de resultados de outros algoritmos e para refinamento de modelos.

Finalmente, conclui-se que a utilização do programa no desenvolvimento deste projeto resultou em benefícios para a qualidade dos resultados e substancial rapidez em sua execução.

## CAPÍTULO 6

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou, brevemente, o problema do controle em sistemas de potência descrevendo as principais atividades envolvidas e os procedimentos existentes para executá-las. Especificou-se um conjunto básico de requisitos para o desenvolvimento de um ambiente computacional que, integrando diversos algoritmos, dá o suporte adequado àquelas atividades.

Descreveu-se, sucintamente, a metodologia utilizada para definir a estrutura do programa.

Apresentou-se um caso exemplo de utilização do SIMAP comparando-o a ensaios de campo.

Apresentam-se, a seguir, as principais conclusões a que se chegou após o desenvolvimento e implementação deste trabalho.

- Os algoritmos implementados para as identificações freqüencial e temporal, para sistemas de baixa ordem, fornecem bons resultados, mesmo considerando-se os erros introduzidos nos dados através da leitura dos oscilogramas. Este é o caso das identificações dos controladores do SEP, que são identificados bloco a bloco, onde cada bloco é de, no máximo, terceira ordem.

- A resposta em freqüência apresenta bons resultados pois trata-se de um algoritmo robusto cujo único ponto que pode apresentar algum problema é o cálculo das raízes com elevada multiplicidade, algo difícil de acontecer em se tratando de sistemas físicos.

- O algoritmo do lugar das raízes apresenta bom desempenho. Para os sistemas de ordem mais alta, constatou-se um elevado tempo de resposta.

- A simulação apresenta excelente desempenho. Tem-se bastante facilidade para declarar o modelo e para efetuar modificações no mesmo. O conjunto de blocos disponíveis na biblioteca mostrou-se suficiente para a representação de todos os modelos dos diversos fenômenos estudados. A capacidade de monitoração e apresentação das curvas mostrou-se plenamente satisfatória.

- Os algoritmos implementados para as transformações auxiliares mostraram-se eficientes. Deve-se ressaltar, porém, que o algoritmo de Fadeev-Leverrier, implementado para transformar uma equação de estado para uma matriz de transferência, é bastante sensível ao condicionamento da matriz A. Este problema foi parcialmente contornado com a introdução de um escalamento da matriz.

- Um ambiente integrado com os algoritmos normalmente utilizados nas atividades de identificação, modelagem e análise dos sistemas de controle para o SEP proporciona um ganho significativo na qualidade e na rapidez dos estudos e ainda permite que novos fenômenos sejam investigados.

- O SIMAP dispõe de um conjunto de algoritmos que permite que os resultados de uns sejam validados por outros. Este fato confere maior confiabilidade aos resultados.

- O programa mostrou-se muito útil na formação e no aperfeiçoamento dos profissionais que envolvem-se com as atividades citadas.

- A estrutura adotada na implementação do SIMAP permite que a sua manutenção e a implantação de novos algoritmos se dê com pequeno esforço.

- O programa apresenta grande portabilidade atendendo assim um dos requisitos especificados. Para executá-lo necessita-se de um microcomputador, IBMPC compatível, com uma configuração bastante comum. O anexo III apresenta as principais características de "software" e "hardware" do SIMAP.

Para futuras implementações, apresentam-se as seguintes sugestões:

- Implementação de macro modelos na biblioteca da simulação como, por exemplo, o modelo IV para representação de geradores.

- Desenvolvimento de programa para traçar as curvas de saída do SIMAP em traçador gráfico.

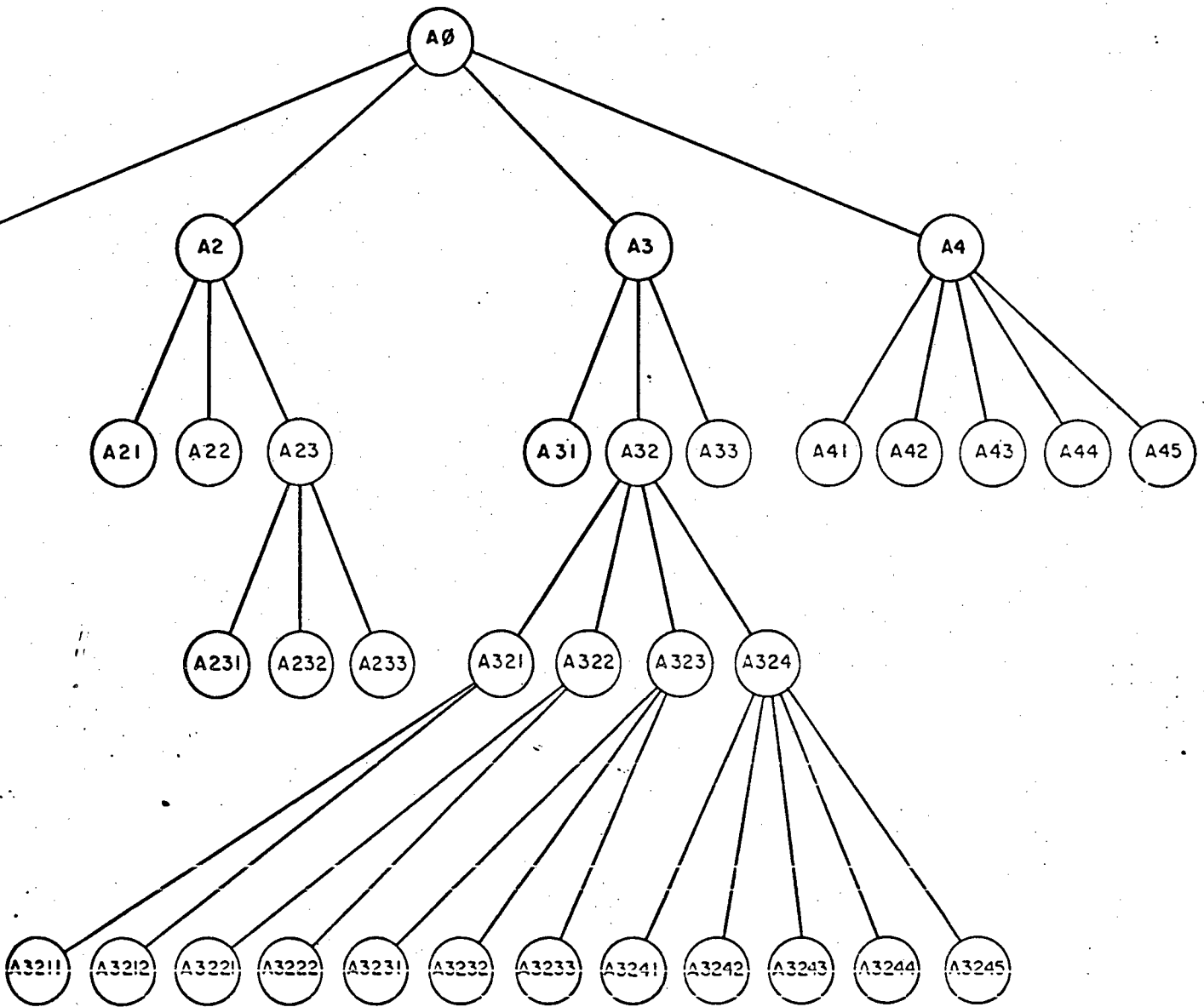
- Implementação de algoritmo para ajuste de curvas.

## APÊNDICE A

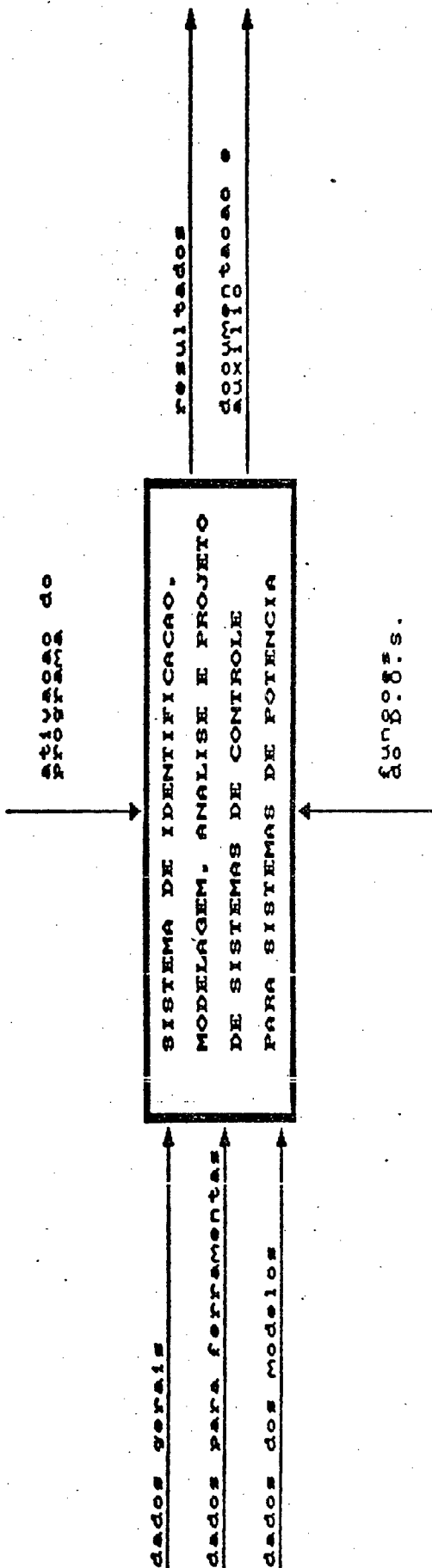
## DIAGRAMAS DA ANÁLISE ESTRUTURADA - SADT

A0 - Sistema de Identificação, Modelagem, Análise e Projeto de Sistemas de Controle para Sistemas de Potência	p2
A2 - Gerenciar Entrada .....	p3
A23 - Realizar Diálogos .....	p6
A3 - Gerenciar Ferramentas .....	p4
A32 - Ativar Ferramenta .....	p7
A321 - Identificar .....	p8
A322 - Analisar .....	p9
A323 - Simular e Linearizar .....	p10
A324 - Executar Algoritmos Auxiliares .....	p11
A4 - Gerenciar Saídas .....	p5



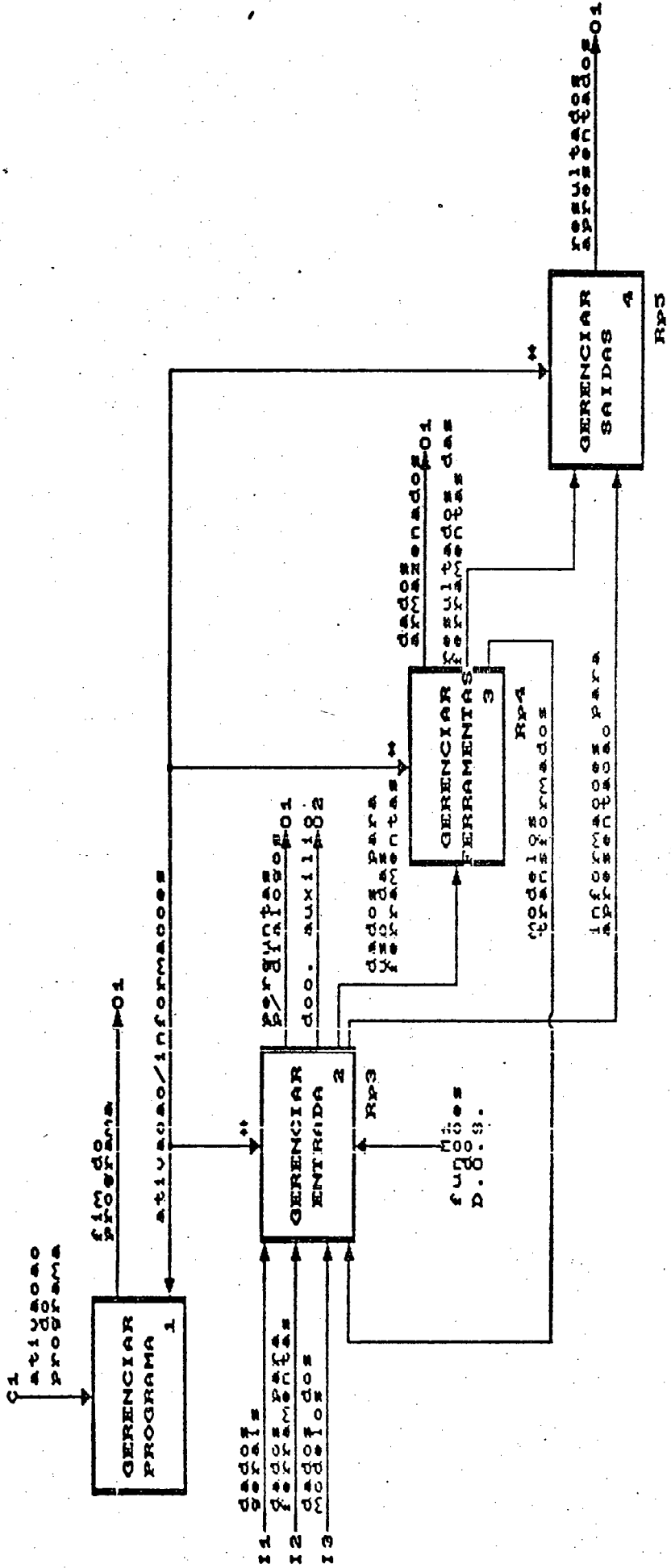


LCMI EEL	Nome do Projeto: SIMAP		Etapas Proposta Aprovacao Publicacao	Leitor	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ				
	Data: 05/04/88 Versao: 1.0				



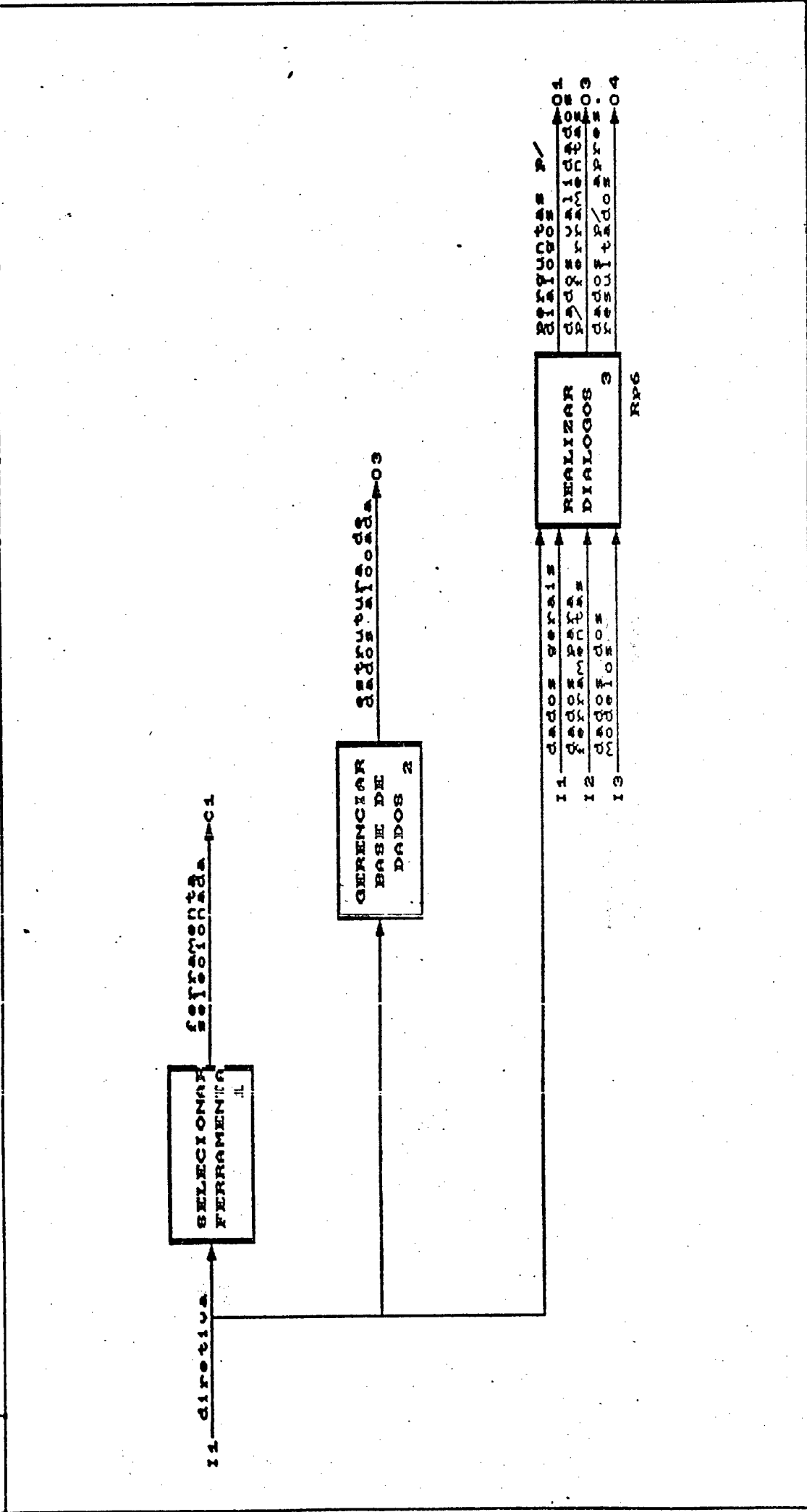
No: AG	Titulo:	Referencia: PI
--------	---------	----------------

LCMI REL	Nome do Projeto: SINAP			Estapas	Leitor	Data
	Autor(es): LUCAS INHADEU DA LUZ			Proposta		
	Data: 05/04/88			Aprovacao		
	Versao: 1.0			Publicacao		



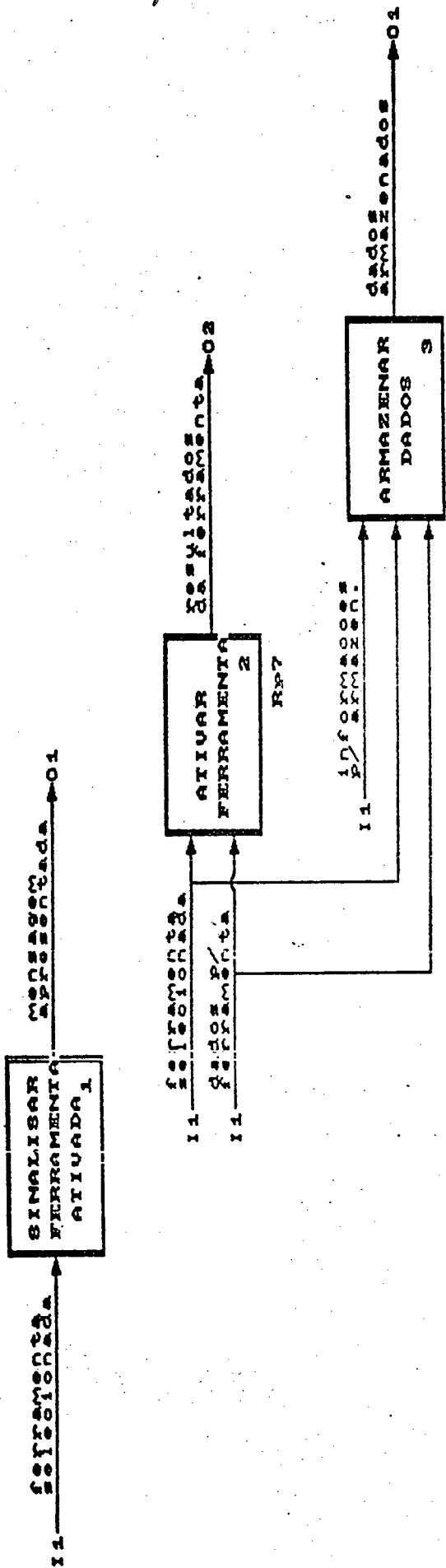
No: 00	Titulo: SISTEMA DE IDENTIFICACAO, MODELAGEM, ANALISE E PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE PARA SISTEMAS DE POTENCIA	Referencia: R2
--------	--	----------------

ICMX EEL	Nome do Projeto: SIMAP Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ Data: 05/04/88 Versao: 1.0			Estado Proposta Aprovacao Publicacao	Leitor	Data
-------------	---	--	--	---	--------	------



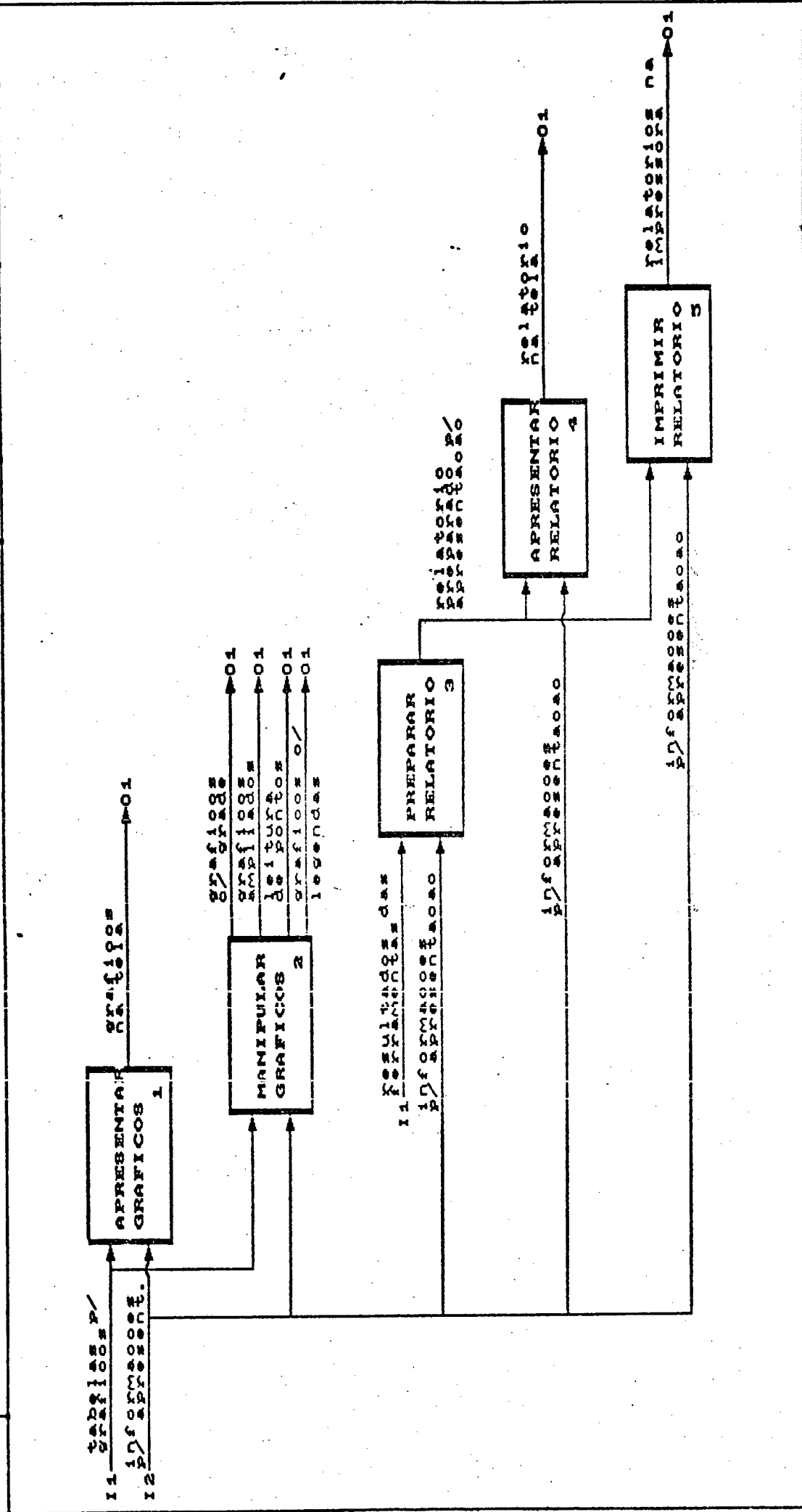
No: A2	Titulo: GERENCIAR ENTRADA	Referencia: PS
--------	---------------------------	----------------

LCMI HEL	Nome do Projeto: SIMAP			Estado	Leitor	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ			Proposta		
	Data: 05/04/88			Aprovacao		
	Versao: 1.0			Publicacao		



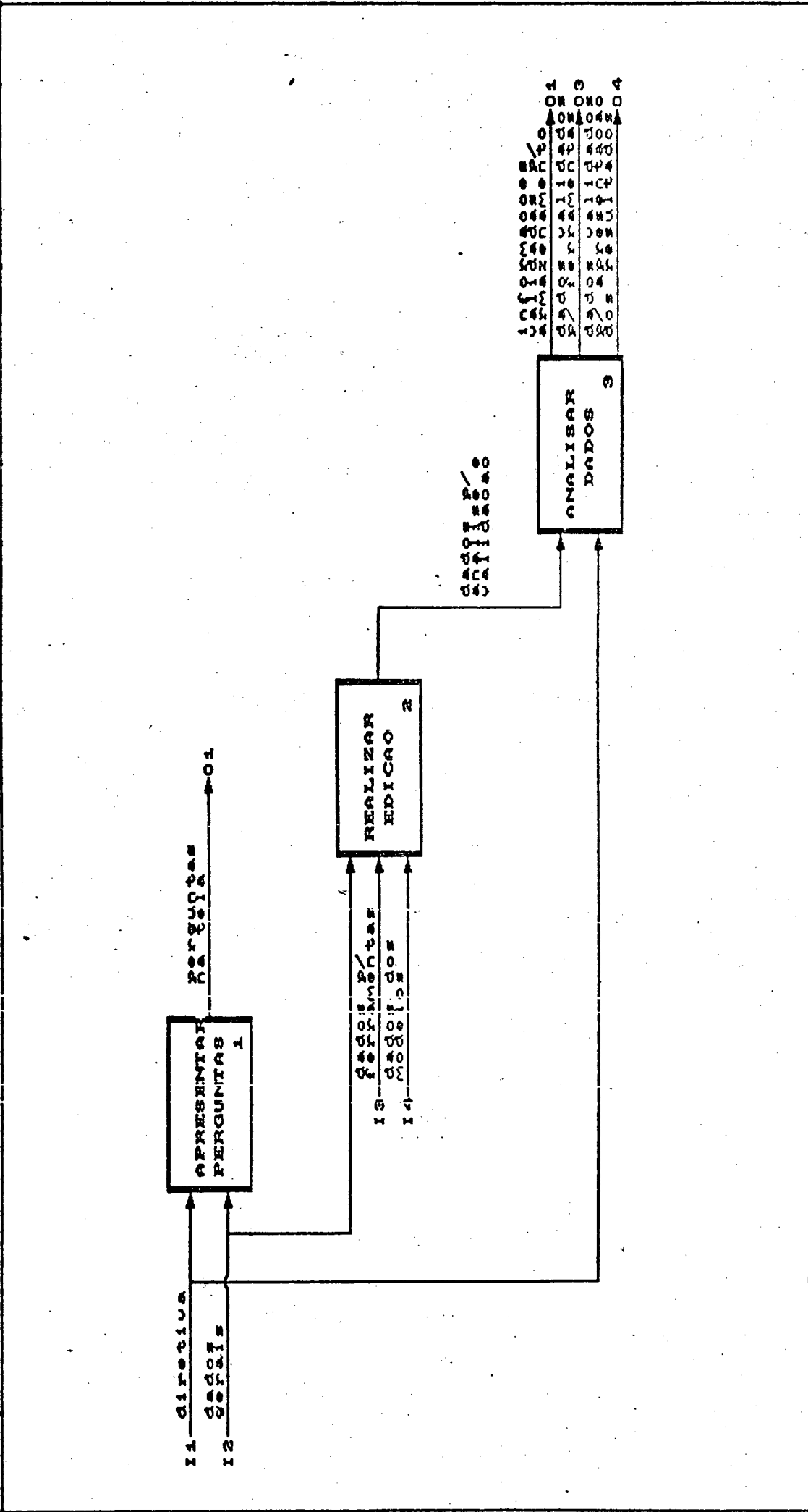
No: A3	Titulo: GERENCIAR FERRAMENTAS	Referencia: PA
--------	-------------------------------	----------------

LCMI EEL	Nome do Projeto: SIMAP			Letor	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ				
	Data: 05/04/88				
	Versão: 1.0				
	EXEMP	PROPOSTA			
		APROVACAO			
		PUBLICACAO			



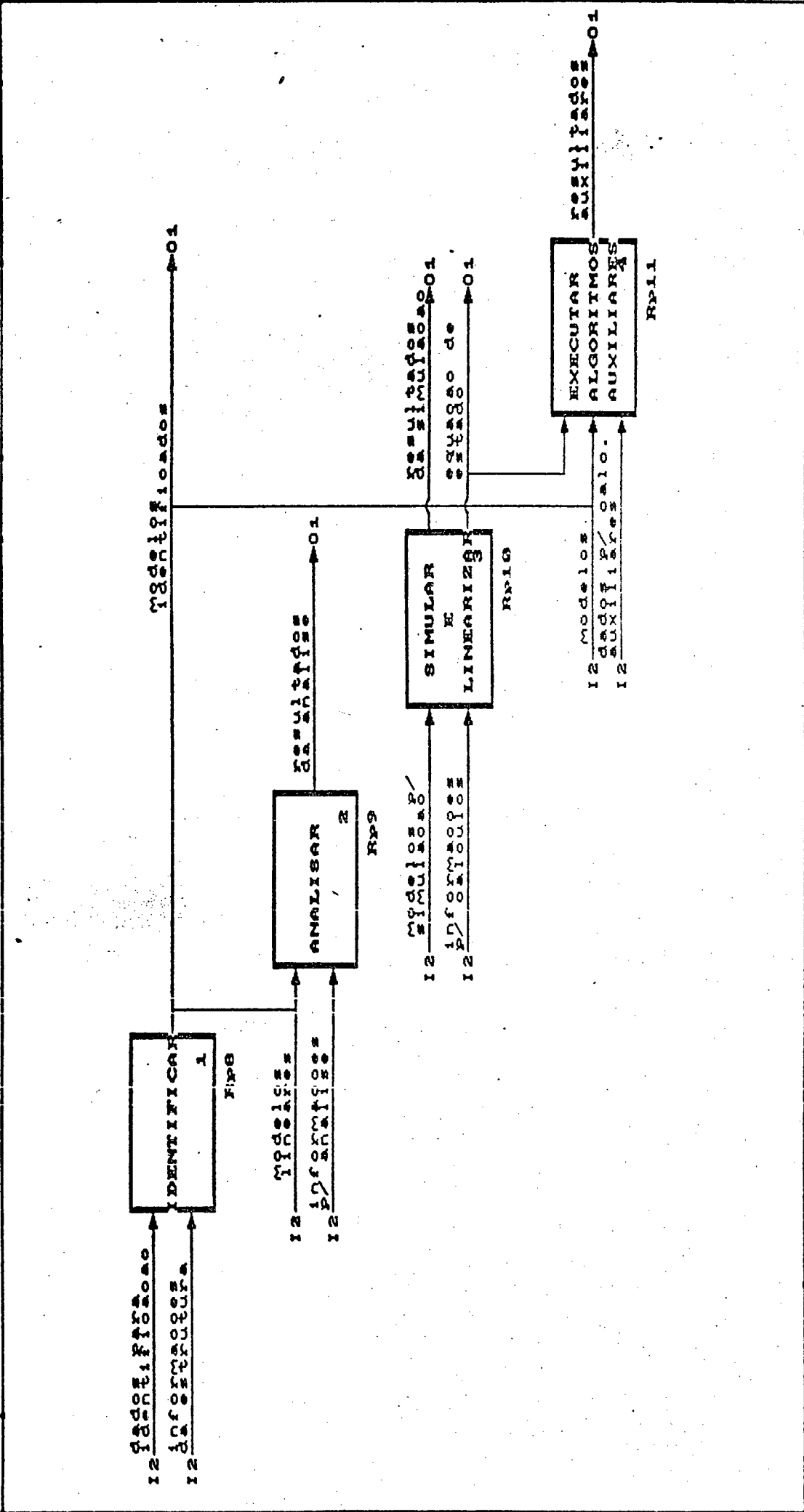
NO: A4	Titulo: GERENCIAR SAIDAS	Referencia: 25
--------	--------------------------	----------------

LCMZ EEL	Nome do Projeto: SIMAP		Estapas	Leitor	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ		Proposta		
	Data: 05/04/88		Aprovacao		
	Versao: 1.0		Publicacao		



No: 023	Titulo: REALIZAR DIALOGOS	Referencia: pg
---------	---------------------------	----------------

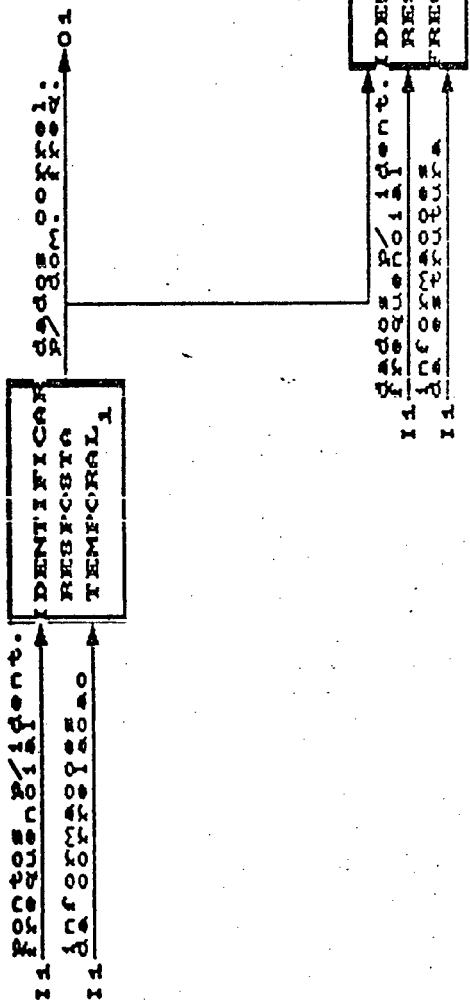
LCMI EEL	Nome do Projeto: SIMAP			Leitor	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ				
	Data: 05/04/88				
	Versão: 1.0				
	Estapas	Proposta	APROVADO	PUBLICADO	



No: A32	Titulo: ATUAR FERRAMENTA	Referencia: PT
---------	--------------------------	----------------

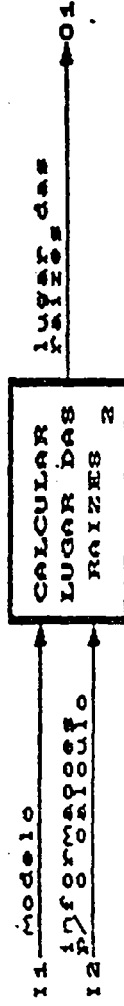
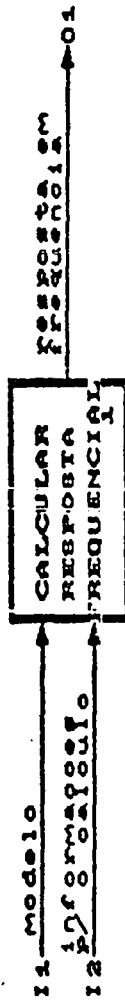


LCMI EEL	Nome do Projeto: SINAP			Lector	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ				
	Data: 05/04/88				
	Versao: 1.0				
	Etapas				
	Proposta				
	Aprovacao				
	Publicacao				



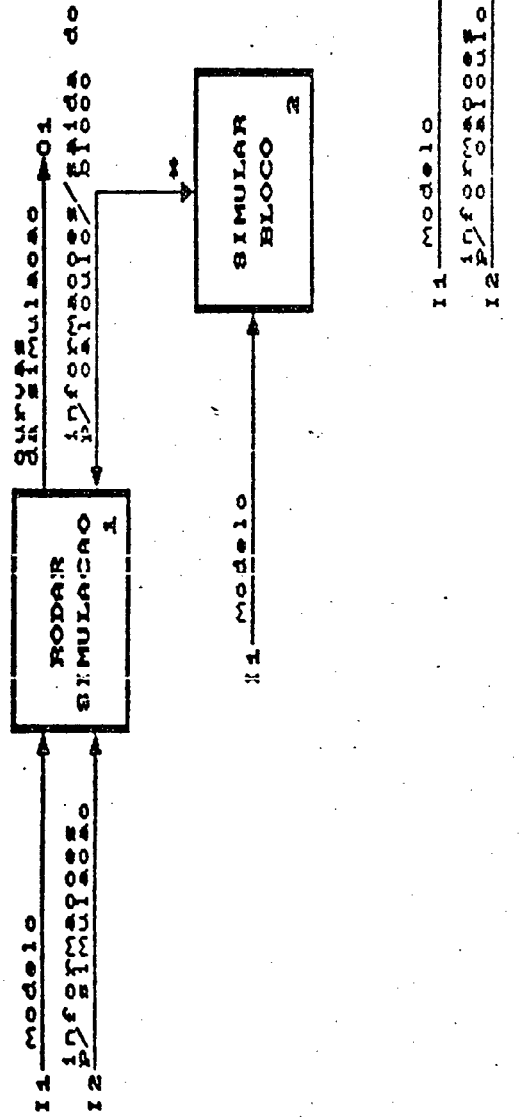
No: A321	Titulo: IDENTIFICACAO	Referencia: 98
----------	-----------------------	----------------

LCMI EEL	Nome do Projeto: SIMAP			Estapas	Leitor	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ					
	Data: 05/04/88			APROVADO		
	Versao: 1.0			PUBLICACAO		



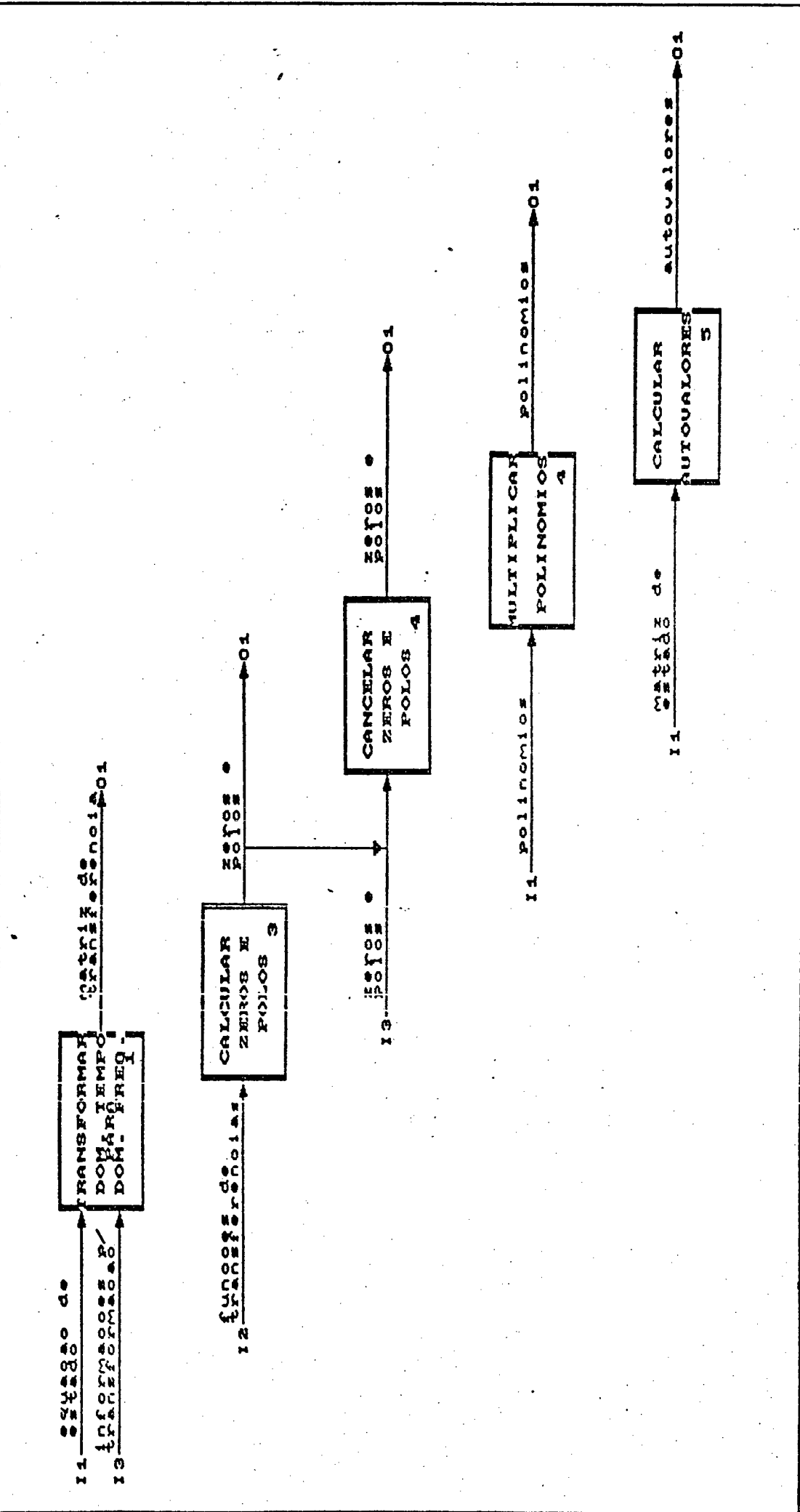
No: A322	Titulo: ANALISAR	Referencia: P9
----------	------------------	----------------

LCMI EEL	Nome do Projeto: SIMAP			Etapas	Leitor	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ					
	Data: 05/04/88					
	Versão: 1.0					
			Proposta			
			Aprovação			
			Publicação			



No: A323	Título: SIMULAR E LINEARIZAR	Referencia: P10
----------	------------------------------	-----------------

LCMI EEL	Nome do Projeto: SIMAP			Estapas Proposta Aprovacao Publicacao	Leitor	Data
	Autor(es): LUCAS THADEU DA LUZ					
	Data: 05/04/88					
	Versao: 1.0					



No: A324	Titulo: EXECUTAR ALGORITMOS AUXILIARES	Referencia: P11
----------	--	-----------------

## APÊNDICE B

## IDENTIFICAÇÃO FREQUENCIAL

Considerando a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{b_0 + b_1 s + \dots + b_m s^m}{a_0 + a_1 s + \dots + a_n s^n} \quad (\text{B.1})$$

$$n \geq m$$

substituindo  $s$  por  $j\omega$  e separando as partes reais e imaginárias dos polinômios do numerador e denominador respectivamente, obtém-se:

$$G(j\omega) = \frac{\alpha + j\omega \beta}{\sigma + j\omega \tau} \quad (\text{B.2})$$

onde:

$$\alpha = b_0 - b_2 \omega^2 + b_4 \omega^4 - \dots$$

$$\beta = b_1 - b_3 \omega^2 + b_5 \omega^4 - \dots \quad (\text{B.3})$$

$$\sigma = a_0 - a_2 \omega^2 + a_4 \omega^4 - \dots$$

$$\tau = a_1 - a_3 \omega^2 + a_5 \omega^4 - \dots$$

Assumindo que os pontos experimentais obtidos do ensaio sejam representados por:

$$F(j\omega)_k = R_k + j I_k \quad (\text{B.4})$$

e escrevendo (B.1) da forma simplificada:

$$G(jw) = \frac{P(jw)}{Q(jw)} \quad (\text{B.5})$$

pode-se obter uma expressão para o erro de ajuste para cada valor de frequência:

$$E(w_k) = F(jw_k) - \frac{P(jw_k)}{Q(jw_k)} \quad (\text{B.6})$$

Para calcular os coeficientes  $b_0, b_1, \dots, b_m, a_0, a_1, \dots, a_n$  basta resolver a minimização do somatório de  $E_k^2$  para todos os pontos experimentais. Para viabilizar esta minimização é necessário efetuar a seguinte transformação:

$$E(w_k) Q(jw_k) = F(jw_k) Q(jw_k) - P(jw_k) \quad (\text{B.7})$$

$$E'(w_k) = E(w_k) Q(jw_k) \quad (\text{B.8})$$

$$E'(w_k) = A(w_k) + j B(w_k) \quad (\text{B.9})$$

$$A(w_k) = \sigma_k R_k - w_k I_k \tau_k - \alpha_k \quad (\text{B.10})$$

$$B(w_k) = w_k \tau_k R_k + \sigma_k I_k - w_k \beta_k \quad (\text{B.11})$$

$$[E'(w_k)]^2 = A(w_k)^2 + B(w_k)^2 \quad (\text{B.12})$$

Para obter a expressão do erro basta substituir (B.10) e (B.11) em (B.12) e efetuar o somatório para todos os pontos.

$$E = \sum_{k=1}^n [(\sigma_k R_k - w_k I_k - \tau_k - \alpha_k)^2 + (w_k \tau_k R_k + \sigma_k I_k - w_k \beta_k)^2] \quad (\text{B.13})$$

esta expressão pode ser escrita simplificadamente:

$$E = \sum_{k=1}^n [A(w_k)^2 + B(w_k)^2] \quad (\text{B.14})$$

lembrando que:

$$\begin{aligned} \sigma_k &= a_0 - a_2 w_k^2 + a_4 w_k^4 - \dots \\ \tau_k &= a_1 - a_3 w_k^2 + a_5 w_k^4 - \dots \\ \alpha_k &= b_0 - b_2 w_k^2 + b_4 w_k^4 - \dots \\ \beta_k &= b_1 - b_3 w_k^2 + b_5 w_k^4 - \dots \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$

Da minimização de (B.13) resulta o seguinte sistema linear:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial b_0} &= \sum_{k=0}^m [2 A(w_k)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_1} &= \sum_{k=0}^m [2 B(w_k) (-w_k)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_2} &= \sum_{k=0}^m [2 A(w_k) (w_k^2)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_3} &= \sum_{k=0}^m [2 B(w_k) (w_k^3)] = 0 \end{aligned}$$

..... (B.16)

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = \sum_{k=0}^m [2 A(w_k) R_k + 2 B(w_k) I_k] = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = \sum_{k=0}^m [2 A(w_k) (-w_k I_k) + 2 B(w_k) (w_k R_k)] = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_2} = \sum_{k=0}^m [2 A(w_k) (-w_k^2 R_k) + 2 B(w_k) (-w_k^2 I_k)] = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_3} = \sum_{k=0}^m [2 A(w_k) (w_k^3 I_k) + 2 B(w_k) (-w_k^3 R_k)] = 0$$

.....

Após a substituição simultânea de (B.15) em (B.10) e (B.11) e o resultado em (B.16) obtem-se o seguinte sistema linear de equações:

$$\begin{bmatrix} L_0 & 0 & -L_2 & 0 & \dots & -S_0 & T_1 & S_2 & -T_3 & \dots \\ 0 & L_2 & 0 & -L_4 & \dots & -T_1 & -S_2 & T_3 & S_4 & \dots \\ -L_2 & 0 & L_4 & 0 & \dots & S_2 & -T_3 & -S_4 & T_5 & \dots \\ 0 & -L_4 & 0 & L_6 & \dots & T_3 & S_4 & -T_5 & -S_6 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -S_0 & -T_1 & S_2 & T_3 & \dots & U_0 & 0 & -U_2 & 0 & \dots \\ T_1 & -S_2 & -T_3 & S_4 & \dots & 0 & U_2 & 0 & -U_4 & \dots \\ S_2 & T_3 & -S_4 & -T_5 & \dots & -U_2 & 0 & U_4 & 0 & \dots \\ -T_3 & S_4 & T_5 & -S_6 & \dots & 0 & -U_4 & 0 & U_6 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \dots \\ a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (B.17)$$

onde:



$$L_h = \sum_{k=1}^n w_k^h$$

$$S_h = \sum_{k=1}^n w_k^h * R_k$$

(B.18)

$$T_h = \sum_{k=1}^n w_k^h * I_k$$

$$U_h = \sum_{k=1}^n w_k^h * (R_k^2 + I_k^2)$$

$$h = 0, 1, 2, \dots$$

## APÊNDICE C

## IDENTIFICAÇÃO TEMPORAL

Considerando-se o par que representa a Transformada de Fourier:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(w) e^{jwt} dw \quad (C.1)$$

$$g(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-jwt} dt \quad (C.2)$$

e sabendo-se:

$$e^{-jwt} = \cos wt - j \sin wt \quad (C.3)$$

substitui-se (C.3) em (C.2) para ter-se:

$$g(w) = \int_{-\infty}^{\infty} [f(t) \cos wt - j f(t) \sin wt] dt \quad (C.4)$$

assumindo-se que:

$$f(t) = f_p(t) + f_i(t) \quad (C.5)$$

$$g(w) = g_r(w) + g_i(w) \quad (C.6)$$

onde:

$$f_p(t) \rightarrow \text{função par}$$

$f_i(t)$   $\rightarrow$  função ímpar

substituindo-se (C.5) em (C.4) e sabendo-se que:

$$f_i(t) \cos wt = 0 \quad (C.7)$$

$$f_p(t) \sen wt = 0$$

obtem-se:

$$g(w) = \int_{-\infty}^{\infty} [f_p(t) \cos wt - j f_i(t) \sen wt] dt \quad (C.8)$$

onde:

$$g_r(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f_p(t) \cos wt dt \quad (C.9)$$

$$g_i(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(t) \sen wt dt \quad (C.10)$$

Quando  $f(t)$  apresenta-se sob a forma de uma tabela de pontos é necessário um tratamento computacional adequado. Tomando como exemplo a curva da Figura C.1 onde o segmento  $t_1 t_2 A_1 A_2$  pode ser representado por:

$$f(t) = \frac{(A_2 - A_1)}{(t_2 - t_1)} t + A_1 - \frac{(A_2 - A_1)}{(t_2 - t_1)} t_1 [u(t-t_1) - u(t-t_2)] \quad (C.11)$$

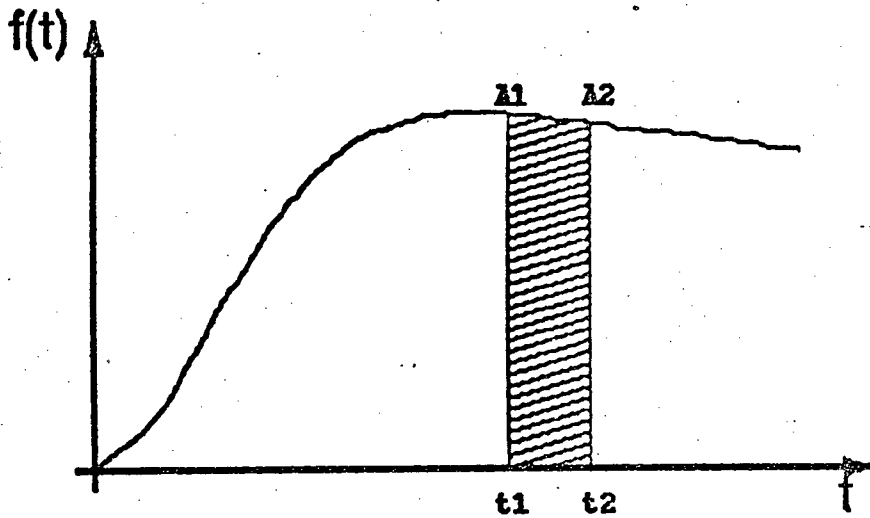


FIGURA C.1 - Curva representativa de  $f(t)$ .

O primeiro fator de (C.11) representa o segmento de linha compreendido entre  $A_1$  e  $A_2$ . O segundo fator representa um intervalo da função entre  $t_1$  e  $t_2$ .

Generalizando podem-se escrever:

$$f(t) = (m_n t + b_n) [u(t - t_n) - u(t - t_{n+1})] \quad (C.12)$$

onde:

$$m_n = \frac{A_{n+1} - A_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (C.13)$$

$$b_n = A_n - \frac{A_{n+1} - A_n}{t_{n+1} - t_n} t_n \quad (C.14)$$

substituindo (C.12) em (C.2) tem-se:

$$g_n(w) = m_n \int_{t_n}^{\infty} t e^{-jwt} dt + b_n \int_{t_n}^{\infty} e^{-jwt} dt - m_n \int_{t_n}^{\infty} t e^{-jwt} dt - b_n \int_{t_n}^{\infty} e^{-jwt} dt \quad (C.15)$$

$$g_n = -\frac{m_n}{w^2} (e^{-j\omega t_n} - e^{-j\omega t_{n+1}}) + \frac{1}{j\omega} [(m_n t_n + b_n) e^{-j\omega t_n} - (m_n t_{n+1} + b_n) e^{-j\omega t_{n+1}}] \quad (C.16)$$

substituindo (C.13) e (C.14) em (C.16) tem-se:

$$g_n(\omega) = -\frac{1}{w^2} \frac{(A_{n+1} - A_n)}{(t_{n+1} - t_n)} (e^{-j\omega t_n} - e^{-j\omega t_{n+1}}) + \frac{1}{j\omega} (A_n e^{-j\omega t_n} - A_{n+1} e^{-j\omega t_{n+1}}) \quad (C.17)$$

Do somatório para todos os pontos da função do domínio do tempo resulta a função correspondente no domínio da frequência.

Se  $t_0 = 0$  e  $A_{k+1} \rightarrow 0$ , então:

$$g(\omega) = \sum g_n(\omega) \quad (C.18)$$

$$g(\omega) = \frac{A_0}{j\omega} + \sum_{n=1}^k \left[ \frac{(A_{n+1} - A_n)}{(t_{n+1} - t_n)} \frac{1}{(-\omega^2)} (\cos \omega t_n - j \operatorname{sen} \omega t_n) - \frac{(A_{n+1} - A_n)}{(t_{n+1} - t_n)} \frac{1}{(-\omega^2)} (\cos \omega t_{n+1} - j \operatorname{sen} \omega t_{n+1}) \right] \quad (C.19)$$

$$g_r(\omega) = \sum_{n=1}^k \left[ \frac{(A_{n+1} - A_n)}{(t_{n+1} - t_n)} \frac{1}{(-\omega^2)} (\cos \omega t_n - \cos \omega t_{n+1}) \right] \quad (C.20)$$

$$g_i(\omega) = -\frac{A_0}{\omega} - \sum_{n=1}^k \left[ \frac{(A_{n+1} - A_n)}{(t_{n+1} - t_n)} \frac{1}{(-\omega^2)} (\operatorname{sen} \omega t_n - \operatorname{sen} \omega t_{n+1}) \right] \quad (C.21)$$

## APÊNDICE D

## BIBLIOTECA DE BLOCOS PARA SIMULAÇÃO

Grupo 1 - Blocos sem entrada

- 1 - Tempo
- 2 - Constante
- 3 - Bloco Aberto
- 4 - Entrada A/D

Grupo 2 - Blocos com Memória

- 1 - Integrador
- 2 - Integrador Limitado
- 3 - Constante de Tempo
- 4 - Avanço atraso com Filtro
- 5 - Quadrático
- 6 - Atraso
- 7 - Tempo Morto

Grupo 3 - Blocos sem Memória

- 1 - Avanço Atraso
- 2 - Biquadrático
- 3 - Derivada

Grupo 4 - Blocos Estáticos

- 1 - Limitador

- 2 - Zona Morta
- 3 - Bang-Bang (Relé)
- 4 - Relé com Zona Morta
- 5 - Relé com Zona Morta e Histerese
- 6 - Histerese
- 7 - Atrito Estático

#### Grupo 5 - Funções

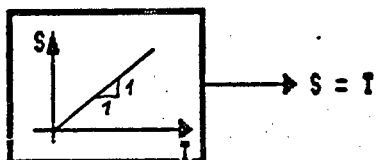
- 1 - Somador Ponderado
- 2 - Multiplicador
- 3 - Divisor
- 4 - Raiz
- 5 - Exponencial
- 6 - Seno
- 7 - Tabela
- 8 - Polinomio

#### Grupo 6 - Gerais

- 1 - Ganho
- 2 - Ganho Paramétrico
- 3 - Ganho Controlado
- 4 - Chaveamento
- 5 - Relé Temporizado
- 6 - Conversor D/A
- 7 - Mínimo
- 8 - Máximo
- 9 - Módulo

## GRUPO 1 - Blocos sem Entrada

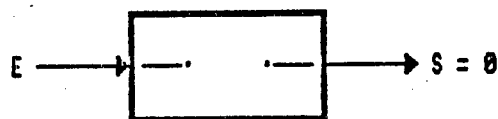
## 1 - TEMPO (RAMPA)



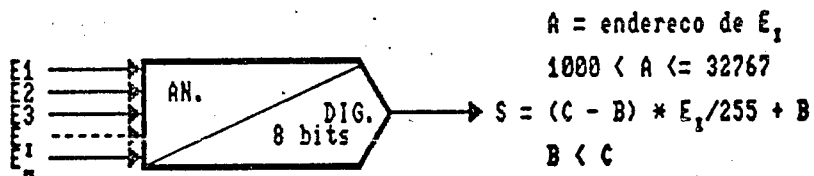
## 2 - CONSTANTE



## 3 - BLOCO ABERTO



## 4 - ENTRADA A/D



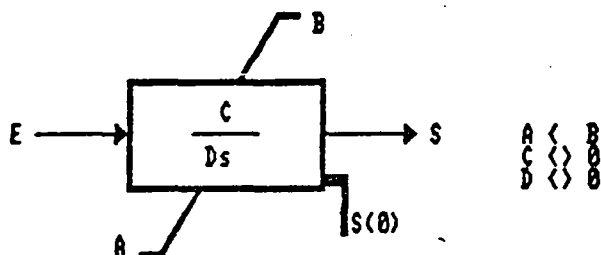


## GRUPO 2 - Blocos com Memória

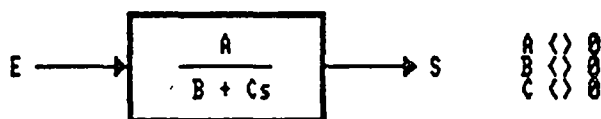
### 1 - INTEGRADOR



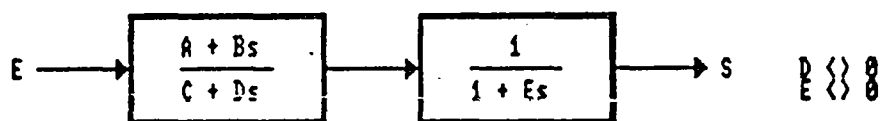
### 2 - INTEGRADOR LIMITADO



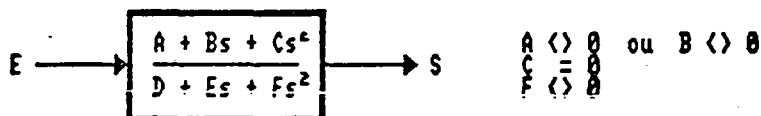
### 3 - CONSTANTE DE TEMPO



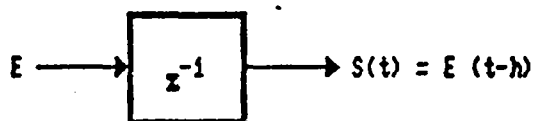
### 4 - AVANCO ATRASO COM FILTRO



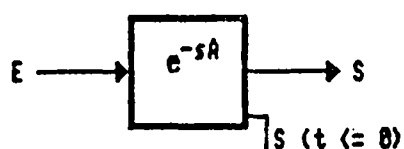
### 5 - BIQUADRATICO



### 6 - ATRASO



### 7 - TEMPO MORTO

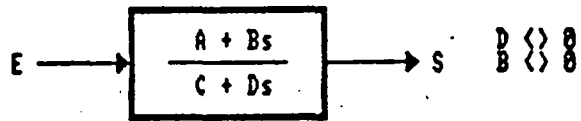


$A$  = Tempo morto (num. intervalos de integ.)  
 $1 \leq A \leq 1000$

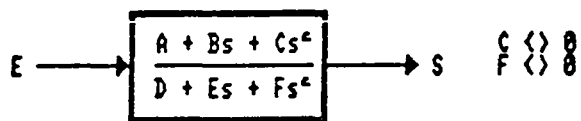
$B$  = numero de ordem do bloco entre os blocos do tipo delay (1 ou 2)

### GRUPO 3 - Blocos sem Memoria

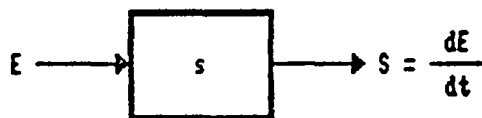
#### 1 - AVANCO ATRASO



#### 2 - BIQUADRATICO

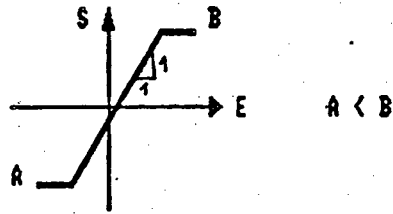


#### 3 - DERIUADA

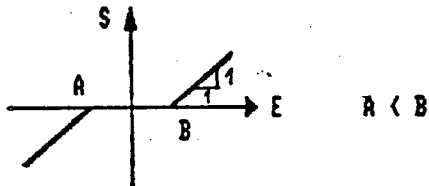


**GRUPO 4 - Blocos Estaticos**

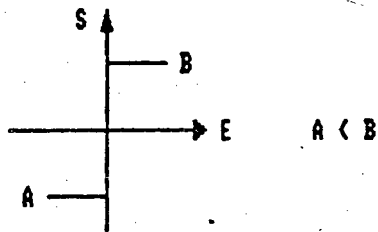
**1 - LIMITADOR**



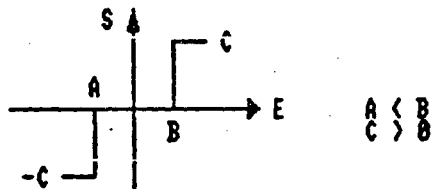
**2 - ZONA MORTA**



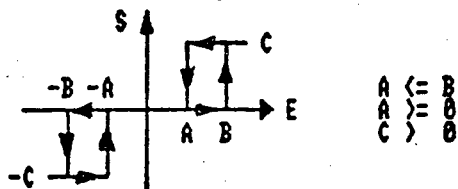
**3 - BANG-BANG (RELE)**

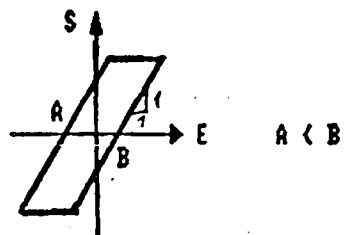
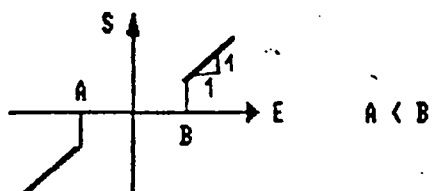


**4 - RELE COM ZONA MORTA**



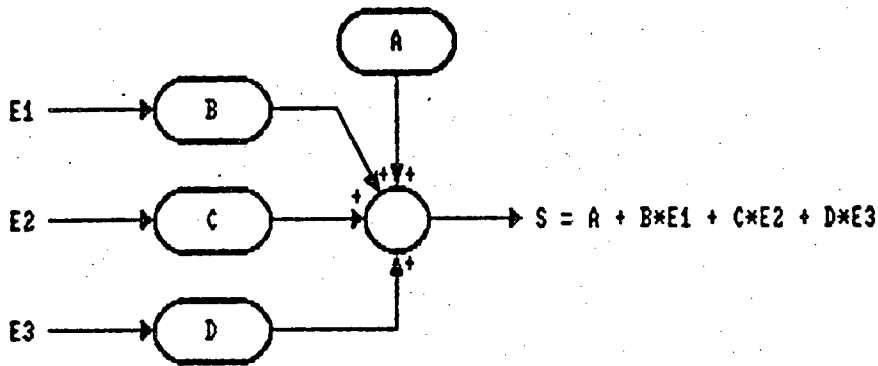
**5 - RELE COM ZONA MORTA E HISTERESE**



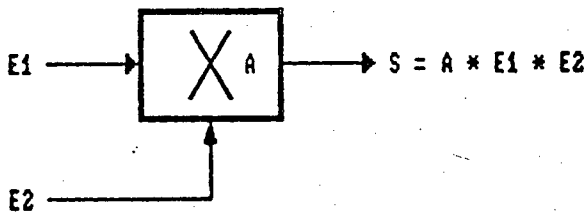
**GRUPO 4 - Blocos Estáticos (continuacao)****6 - HISTERESE****7 - ATRITO ESTÁTICO**

**GRUPO 5 - Funcoes**

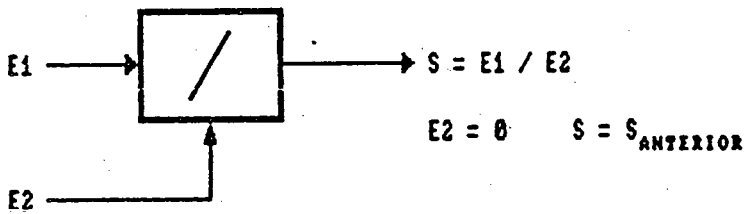
**1 - SOMADOR**



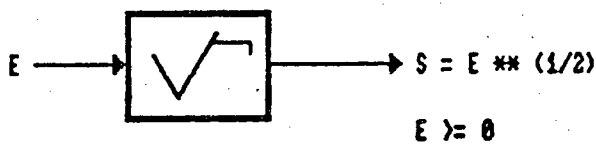
**2 - MULTIPLICADOR**



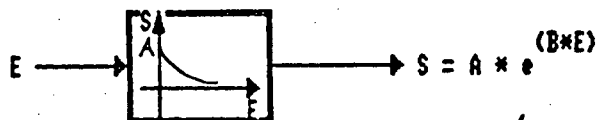
**3 - DIVISOR**



**4 - RAIZ**

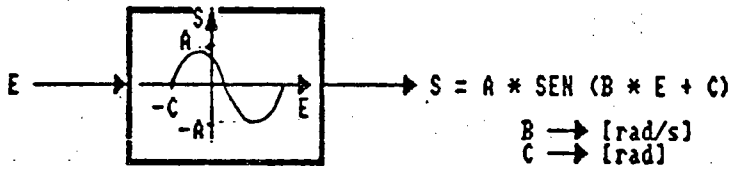


**5 - EXPONENCIAL**

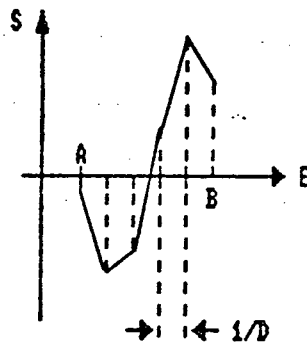


## GRUPO 5 - Funcoes (continuacao 2)

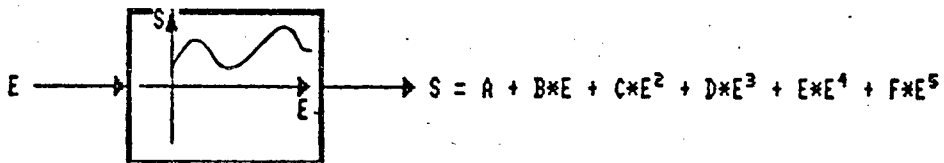
## 6 - SENO



## 7 - TABELA

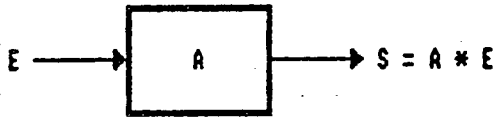


## 8 - POLINOMIO

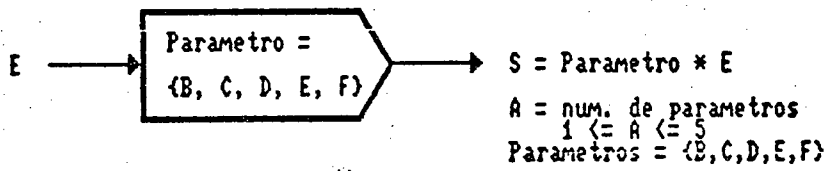


**GRUPO 6 - Gerais**

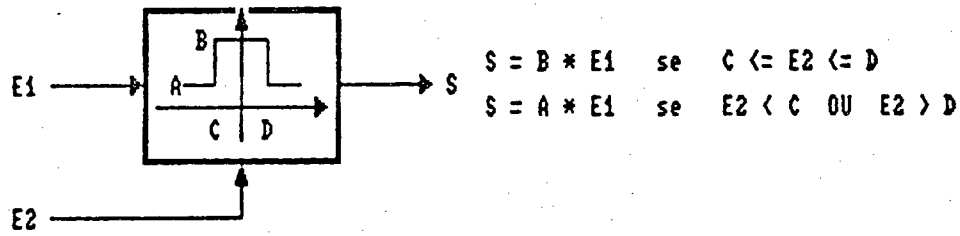
**1 - GANHO**



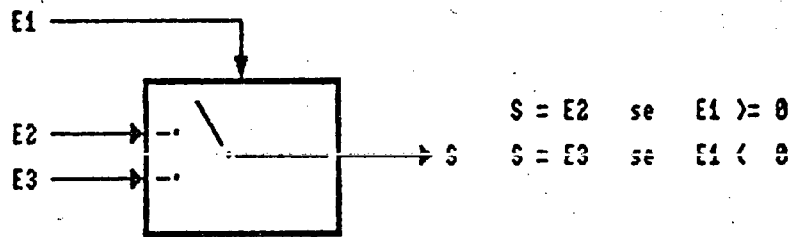
**2 - PARAMETRO**



**3 - GANHO CONTROLADO**

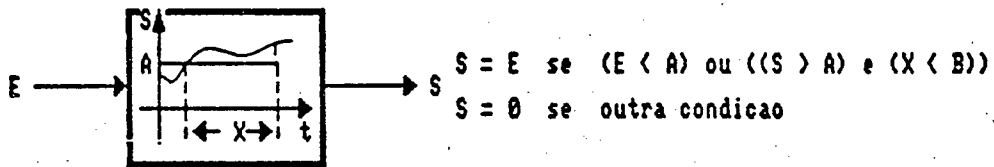


**4 - CHAVEAMENTO**

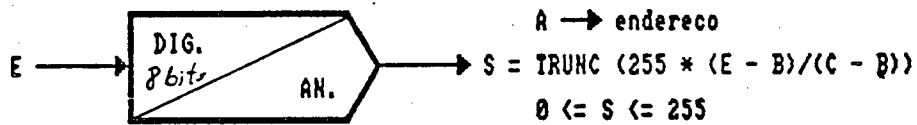


**GRUPO 6 - Gerais (continuacao)**

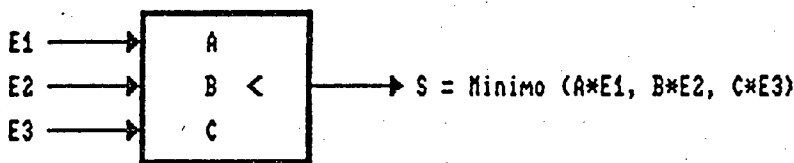
**5 - RELE TEMPORIZADO**



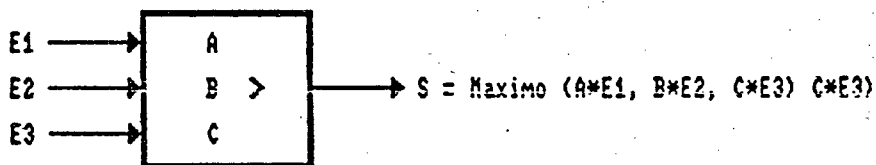
**6 - CONVERSOR D/A**



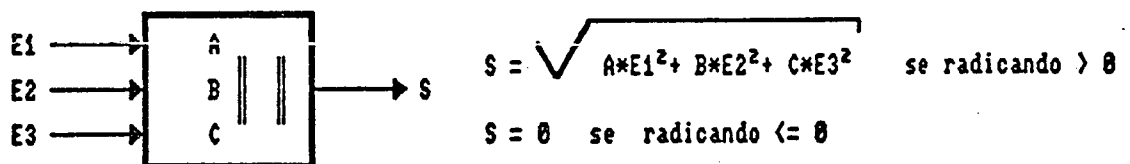
**7 - MINIMO**



**8 - MAXIMO**



**9 - MODULO**





## APÊNDICE E

## COEFICIENTES PARA A INTEGRAÇÃO NUMÉRICA

Apresentam-se, neste apêndice, os coeficientes utilizados para efetuar a integração numérica do algoritmo de simulação.

Considerando-se o modelo de integrador, apresentado na Figura E.1 e a fórmula genérica (E.1), para realizar a integração, obtem-se os coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  para cada tipo de bloco dinâmico existente na biblioteca da simulação.

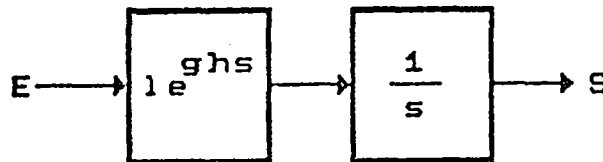


FIGURA E.1 - Modelo do integrador.

O modelo de integrador, apresentado na Figura E.1, representa a generalização de um método de integração implícito de segunda ordem. Os parâmetros "l" e "g" definem um caso particular do método, por exemplo,  $l=1$  e  $g=0,5$  definem o método trapezoidal. O parâmetro "h", do modelo apresentado, representa o passo de integração utilizado.

$$S_{k+1} = C_1 S_k + C_2 S'_{k+1} + C_3 S'_k \quad (E.1)$$

**E.1 - Integrador**

$$C1 = 1$$

$$C2 = 1 h g$$

$$C3 = 1 h (1 - g)$$

**E.2 - Constante de tempo**

$$C1 = \frac{C - 1 h (1 - g) B}{C + 1 h g B}$$

$$C2 = \frac{1 h g A}{C + 1 h g B}$$

$$C3 = \frac{1 h (1 - g) A}{C + 1 h g B}$$

**E.3 - Avanço atraso**

$$C1 = \frac{D - 1 h (1 - g) C}{D + 1 h g C}$$

$$C2 = \frac{B}{C} + \frac{1 h g (A D - C B)}{(D + 1 h g C) D}$$

$$C3 = \frac{1 h (1 - g) (A D - C B) - [D - 1 h (1 - g) C] B}{(D + 1 h g C) D}$$

**E.4 - Biquadrático**

$$C1 = \frac{1 + 1 h g [e - 1 h (1 - g) d]}{1 + 1 h g (e + 1 h g d)}$$

$$C2 = \frac{1 h g [(a - c d) + 1 h g (e a - d b)]}{1 + 1 h g (e + 1 h g d)}$$

$$C3 = \frac{1 h (1 - g) [(a - c d) + 1 h g (e a - d b)]}{1 + 1 h g (e + 1 h g d)}$$

$$C4 = \frac{- 1 h d}{1 + 1 h g (e + 1 h g d)}$$

Onde :

A, B, C, D, E e F : são os parâmetros dos blocos.

$$a = A / F$$

$$b = B / F$$

$$c = C / F$$

$$d = D / F$$

$$e = E / F$$

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ 1] ALVARADO, F. L., LASSETER, R. H., SANCHEZ, J. J., Testing of Trapezoidal Integration with Damping For the Solution of Power Transient Problems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, n. 12, Dezembro 1983.
- [ 2] CHEN, C. F., HAAS, I. J., Elements of Control Systems Analysis : Classical and Modern Approaches, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, N. J., 1968.
- [ 3] CHEN, C. T., Introduction to Linear System Theory, Holt, Rinehart and Winston, 1970.
- [ 4] DE MELLO, F. P., CONCORDIA, C., Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, IEEE Transactions on PAS, vol. 88, n. 4, 316-331, 1969.
- [ 5] DE MELLO, F. P., Electrical Machine Dynamics I - Course Notes, PTI, Schenectady, New York, 1971.
- [ 6] DE MELLO, F. P., Dinâmica das Máquinas Elétricas - I, Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência - Série PTI, ELETROBRÁS/UFSM, Santa Maria, RS, 1979.
- [ 7] DE MELLO, F. P., Dinâmica das Máquinas Elétricas - II, Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência - Série PTI, ELETROBRÁS/UFSM, Santa Maria, RS, 1979.

- [ 8] DE MELLO, F. P., Dinâmica e Controle da Geração, Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência - Série PTI, ELETROBRÁS/UFMS, Santa Maria, RS, 1979.
- [ 9] "Desenvolvimento de Sistemas de Controle Auxiliado por Computador - Requisitos do Sistema", DTIA 10/84, DCP, CTI, julho 1984;
- [10] "Desenvolvimento de Sistemas de Controle Auxiliado por Computador - Metodologia de Trabalho", DTIA 09/84, DCP, CTI, junho 1984;
- [11] DOMMEL, H. W., SATO, N., Fast Transient Stability Solutions, IEEE, Julho/Agosto de 1972.
- [12] DONGARRA, J. J., MOLER, C. B., BUNCH, J. R. e STEWART, G. W., LINPACK User's Guide, Siam, Philadelphia, 1979.
- [13] LEHMAN, M. N., "Programs, Life Cycles, and Laws of Software Evolution", IEEE - Proceedings, vol. 68, no. 9, p.p. 1060-1076, setembro de 1980;
- [14] NORMEY RICO, J. E., BRUCIAPAGLIA, A. H., "Un Algoritmo Numericamente Eficiente para el Trazado del Lugar de Raices", Anais do III CLA pp 290-294, Chile, 1988.
- [15] PARNAS, D. L., "On the Criteria to be Used in Decomposing Systems into Modules", Communications of the ACM, p.p. 1053-1058, dezembro de 1972;
- [16] PRESSMAN, R. S., Software Engineering - A Practitioner's Approach, McGraw-Hill Book Company, 1982;

- [17] OGATA, K., Engenharia de Controle Moderno, Prentice-Hall do Brasil Ltda., RJ, 1982.
- [18] ROCHA, A. R. C., Análise e Projeto Estruturado de Sistemas, Editora Campus Ltda, 1987;
- [19] ROSS, D. T., SCHOMAN, K. E., "Strutured Analysis for Requirements Definition", IEEE - Transactions on Software Engineering, Janeiro, 1977.
- [20] ROSS, D. T., "Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas", IEEE - Transactions on Software Engineering, no. 1, p.p. 16-34, janeiro de 1974;
- [21] SANATHANAN, C. K., KOERNER, J., "Transfer Function Synthesis as a Ratio of Two Complex Polynomials", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 8, n. 56, p.p. 56-58, 1963.
- [22] SAVI, V. M., "Projeto Assistido por Computador para Sistemas de Controle: Especificação e Projeto de um Pacote", Dissertação de Mestrado - EEL, UFSC, Maio de 1987;
- [23] SAVI, V.; CASTELAN, E. B.; BRUCIAPAGLIA, A. H.; FARINES, J. M.; CUNHA, A. P.; SOUZA, J. H. ; Uma Visão Sobre o Desenvolvimento de Pacotes de Projeto Assistido por Computador para Sistemas de Controle, 7 CBA, 1988.
- [24] SAVI, V.; CASTELAN, E. B.; BRUCIAPAGLIA, A. H.; FARINES, J. M.; Aspectos de Projeto e Implementação de um Software Iterativo para Sistemas de Controle, III CLA, Chile, 1988.

- [25] SOARES, J. M., "Identificação Experimental, Simulação e Ajuste de Reguladores de Velocidade de usinas Hidrelétricas com Verificação em Testes de Campo", Dissertação de Mestrado, Santa Maria, 1982.
- [26] SOARES, J. M., Simulação de Sistemas Dinâmicos - Manual do Usuário, REIVAX, SC, 1988.
- [27] SOUZA, J. H., Pacote Gráfico - APGRAF, Manual do Usuário, LCMÍ, UFSC, 1989;
- [28] VIDYASAGAR, M., Nonlinear Systems Analysis, Prentice-Hall Inc., Englewood cliffs, N. J., 1978.
- [29] YEH, R. T., ZANE, P., "Specifying Software Requirements", IEEE - Proceedings, vol. 68, no. 9, p.p. 1077- 1085, setembro de 1980;
- [30] YOUNG, C. C., Modern Concepts of Power System Dynamics - The Synchronous Machine, IEEE Tutorial Course, Publicação n. 70M62-PWR, 1970.
- [31] ZENI JUNIOR, N., Sistema de Excitação da UHE Itaúba: Identificação Através de Ensaios de Campo, Ajustes, Modificações Implementadas e Modelo Analógico para Estudos de Estabilidade, Relatório DES/SCS 001/83, CEEE, 1983.
- [32] ZENI JUNIOR, N., "Controle da Excitação de Geradores de Usinas Hidrelétricas: Modelagem, Identificação, Ajustes e Ensaios de Campo", Dissertação de Mestrado, Florianópolis, 1987.

- [33] ZENI JUNIOR, N., Estabilizador de Sistema de Potência-Usina Hidrelétrica de Itaúba, Relatório SOSP/CREI/SDC, CEEE, 1990.
- [34] ZENI JUNIOR, N., "Teoria de Controle Aplicada ao Problema de Solução Iterativa; Um Algoritmo Global e Assintoticamente Estável para o Isolamento das Raízes Múltiplas de um Polinômio", Anais do 1º Congresso Latino americano de Informática, pg. 856-859, Brasil, 1984.



## ANEXO I

## LISTAGEM DO MODELO DO GERADOR CONTRA BARRA INFINITA

----- CEEE -----				
: Topologia do Modelo :				
-----				
Bloco	Nome	Ent1	Ent2	Ent3
5	Somador	2	4	
13	f(E'q)	2		
14	Soma freq	16		
6	Multiplic	5	14	
17	delta	16		
18	Coseno	17		
7	Somador	6	-18	
8	Id	7		
3	Somador	2	-4	-8
4	T'do	3		
9	Somador	6	-8	
10	Somador	3	8	
11	Somador	2	10	
12	Soma EI	13	11	
1	Efd	-12	41	
2	T'do	1		
19	Senc	17		
20	Multiplic	6	19	
28	Multiplic	14	27	
21	Multiplic	18	28	
22	Somador	20	21	
23	Pe	22		
15	Soma Pot	-23		
16	delta w	15		
29	Somador	19	28	
30	iq	29		
27	T''qo	-30		
31	Somador	-30	28	
32	Vt	9	31	
24	Divisor	23	32	
25	Modulo	6	24	28
26	Somador	-25	32	

-----  
Descricao dos Blocos

Bloco :	5	13	14	6	17
Tipo :	SOM	EXP	SOM	MUL	INT
Cond Inic :	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.79360E-01
Entrada :	6.77088E-01	6.94612E-01	1.00040E+00	6.77356E-01	3.95666E-04
Saida :	6.77088E-01	1.18074E-02	1.00040E+00	6.77356E-01	1.08349E+00
A :	0.00000E+00	4.12950E-05	1.00000E+00	1.00000E+00	3.77000E+02
B :	6.76100E-01	8.14230E+00	1.00000E+00		1.00000E+00
C :	3.23900E-01				
D :					
E :					
F :					

-----

Bloco :	18	7	8	3	4
Tipo :	SIN	SOM	GAN	SOM	INT
Cond Inic :	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.80774E-01
Entrada :	1.08349E+00	2.02377E-01	2.02377E-01	-1.15857E-02	-1.15857E-02
Saida :	4.74979E-01	2.02377E-01	4.91325E-01	-1.15857E-02	6.40386E-01
A :	1.01437E+00	0.00000E+00	2.42777E+00	0.00000E+00	1.00000E+00
B :	1.00000E+00	1.00000E+00		1.00000E+00	9.50000E-02
C :	1.57080E+00	1.00000E+00		1.00000E+00	
D :				1.33700E-01	
E :					
F :					

-----

Bloco :	9	10	11	12	1
Tipo :	SOM	SOM	SOM	SOM	SOM
Cond Inic :	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
Entrada :	5.71819E-01	4.63261E-01	1.06865E+00	1.08046E+00	-1.08046E+00
Saida :	5.71819E-01	4.63261E-01	1.06865E+00	1.08046E+00	-1.08046E+00
A :	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
B :	1.00000E+00	2.42230E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00
C :	2.14800E-01	1.00000E+00	8.07400E-01	1.00000E+00	1.00000E+00
D :					
E :					
F :					

-----

-----+  
|  
|                                    **Descricao dos Blocos**                                    |  
|  
-----+

<b>Bloco :</b>	<b>2</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>28</b>	<b>21</b>
<b>Tipo :</b>	<b>INT</b>	<b>SIN</b>	<b>MUL</b>	<b>MUL</b>	<b>MUL</b>
<b>Cond Inic :</b>	9.46974E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
<b>Entrada :</b>	-1.08046E+00	1.08349E+00	6.07112E-01	-5.27869E-01	-2.50727E-01
<b>Saida :</b>	6.94499E-01	8.96297E-01	6.07112E-01	-5.27869E-01	-2.50727E-01
<b>A :</b>	1.00000E+00	1.01437E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00
<b>B :</b>	9.55000E+00	1.00000E+00			
<b>C :</b>		0.00000E+00			
<b>D :</b>					
<b>E :</b>					
<b>F :</b>					

-----+

<b>Bloco :</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>29</b>
<b>Tipo :</b>	<b>SOM</b>	<b>GAN</b>	<b>SOM</b>	<b>PL0</b>	<b>SOM</b>
<b>Cond Inic :</b>	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
<b>Entrada :</b>	3.56385E-01	3.56385E-01	-1.92273E-03	-1.92273E-03	3.68428E-01
<b>Saida :</b>	3.56385E-01	8.65223E-01	-1.92273E-03	3.95348E-04	3.68428E-01
<b>A :</b>	0.00000E+00	2.42777E+00	8.63300E-01	1.00000E+00	0.00000E+00
<b>B :</b>	1.00000E+00		1.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00
<b>C :</b>	1.00000E+00			7.31800E+00	1.00000E+00
<b>D :</b>					
<b>E :</b>					
<b>F :</b>					

-----+

<b>Bloco :</b>	<b>30</b>	<b>27</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>24</b>
<b>Tipo :</b>	<b>GAN</b>	<b>PL0</b>	<b>SOM</b>	<b>MOD</b>	<b>DIV</b>
<b>Cond Inic :</b>	0.00000E+00	-4.21631E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
<b>Entrada :</b>	3.68428E-01	-8.94460E-01	-7.19999E-01	-1.48179E-01	9.41029E-01
<b>Saida :</b>	8.94460E-01	-5.27704E-01	-7.19999E-01	9.19443E-01	9.41029E-01
<b>A :</b>	2.42777E+00	5.96200E-01	0.00000E+00	1.00000E+00	Sem Param.
<b>B :</b>		1.00000E+00	2.14800E-01	1.00000E+00	
<b>C :</b>		1.25000E-01	1.00000E+00	0.00000E+00	
<b>D :</b>					
<b>E :</b>					
<b>F :</b>					

-----+

## ANEXO II

## EQUAÇÃO DE ESTADO DO GERADOR CONTRA BARRA INFINITA

----- CEEE -----					
Sistema Linearizado					
Matriz A					
-----					
linha 1 :	0.00000E+00	0.00000E+00	3.77000E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
linha 2 :	-2.44549E+00	-1.16330E+01	-3.16232E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.21625E+00	
linha 3 :	-3.20820E-01	-7.66070E-02	-2.54619E-01	-2.39387E-01	0.00000E+00
	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-1.59909E-01	
linha 4 :	-8.32325E+00	0.00000E+00	4.88232E+00	-1.95795E+01	0.00000E+00
	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
linha 5 :	-5.90192E+02	8.35539E+02	3.14834E+03	-1.80771E+03	0.00000E+00
	-6.57895E+03	0.00000E+00	0.00000E+00	1.74470E+03	
linha 6 :	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00000E+00
	-1.05263E+02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
linha 7 :	-9.54872E-01	1.83646E+01	6.37747E+01	-2.69355E+01	0.00000E+00
	0.00000E+00	0.00000E+00	-3.87597E+02	3.83503E+01	
linha 8 :	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
	0.00000E+00	1.00000E+00	-2.51938E+01	0.00000E+00	
linha 9 :	-9.93290E-02	1.59842E-01	-1.28445E-01	0.00000E+00	0.00000E+00
	-2.09424E+01	0.00000E+00	2.09424E+01	-4.85018E-01	
-----					

```

+----- CEEE -----+
|                               |
|           Sistema Linearizado |
|           Matriz B           |
|                               |
+-----+

```

linha 1 : 0.00000E+00

linha 2 : 0.00000E+00

linha 3 : 0.00000E+00

linha 4 : 0.00000E+00

linha 5 : 0.00000E+00

linha 6 : 0.00000E+00

linha 7 : 0.00000E+00

linha 8 : 0.00000E+00

linha 9 : 2.09424E+01

```

+-----+
|                               |
|           Matriz C           |
|                               |
+-----+

```

linha 1 : -8.97092E-02 1.27002E-01 4.78548E-01 -2.74773E-01 0.00000E+00  
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.65194E-01

```

+-----+
|                               |
|           Matriz D           |
|                               |
+-----+

```

linha 1 : 0.00000E+00

```

+-----+

```

## ANEXO III

## CARACTERÍSTICAS DE "SOFTWARE" E "HARDWARE"

O programa foi desenvolvido em linguagem Pascal. As rotinas matemáticas para a solução de sistemas lineares, para o cálculo dos autovalores e para o cálculo das raízes de uma equação utilizam FORTRAN. Para o suporte gráfico foi utilizado o pacote APGRAF desenvolvido no LCM I em linguagem C.

O programa é constituído dos seguintes arquivos:

Programa principal:	SIMAP.EXE
Mensagens de erro:	MENSAGEM.SMP
Atributos de instalação:	ATRIB.SMP
Instalação:	INSTALA.EXE
Sistema operacional:	DOS 3.3

"Hardware" necessário:

Máquina:	microcomputador IBMPC XT compatível
Memória:	640 Kbytes
Armazenamento:	2 "drives" de, no mínimo, 360 Kbytes ou 1 "drive" e 1 winchester