

Armando Barbot Campos Matos

Simulação Computacional  
de Redes de C. de  
Ferro Electrificadas

DEEC  
FEUP  
1980

ARMANDO BARBOT CAMPOS MATOS

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE REDES  
DE CAMINHOS DE FERRO ELECTRIFICADAS

Faculdade de Engenharia  
Porto ... 1980

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE REDES DE CAMINHOS  
DE FERRO ELECTRICIFICADAS

ARMANDO BARBOT CAMPOS MATOS

DISSERTAÇÃO DE DOUTORAMENTO APRESENTADA À  
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

625(043) MAT/SIM  
UNIVERSIDADE DO PORTO  
Faculdade de Engenharia  
BIBLIOTECA M  
N.º 12603 -vf  
CDU 621.331.001(043)  
Data 23 / 12 / 1982

U. P. 2882

DEEC  
FEUP

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTECNICA

FACULDADE DE ENGENHARIA

UNIVERSIDADE DO PORTO

043D

M38,1

ex. 1

PORTO, 1980.

## AGRADECIMENTOS

Várias pessoas contribuíram de diversas formas e em diferentes fases para este trabalho; em particular queremos expressar o nosso reconhecimento ao Dr. Ferreira de Oliveira e Dr. Almeida do Vale da F.E.U.P., ao Dr. Alexandre Cerveira da U.H.L., ao Dr. Allan e Dr. Brameller do U.M.I.S.T.. Agradecemos igualmente aos Eng. Campos Moura e Eng. Carlos Vicente da C.P. todos os dados fornecidos.

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	1
	1.1 Objectivo do trabalho	2
	1.2 Estrutura geral do trabalho	4
	1.3 Trabalhos anteriores	6
	1.4 Trabalhos futuros; o problema da optimização	7
CAPÍTULO 2	COMPONENTES DO SISTEMA	10
	2.1 O que incluir no sistema	11
	2.2 Estrutura da informação	14
CAPÍTULO 3	EQUAÇÕES DO SISTEMA	24
	3.1 Introdução	25
	3.2 O estado do sistema	25
	3.3 As equações dinâmicas do sistema	27
	3.4 Aspecto global das equações	28
	3.5 Formulação das equações eléctricas	29
	3.6 Equações de tracção (característi- cas de tracção	34
	3.7 Algumas aproximações efectuadas na formulação das equações	35

CAPÍTULO 4	RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO SISTEMA	42
	4.1 Introdução	43
	4.2 Formulação do método em linhas gerais	44
	4.3 Solução das equações estáticas	45
	4.4 Solução das equações dinâmicas	54
CAPÍTULO 5	REPRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE TRACÇÃO	67
	5.1 Introdução	68
	5.2 Objectivos das subrotinas de tracção	69
	5.3 Esquema geral de tracção para as automotoras U.T.E.-Si	70
	5.4 Restrições às grandezas de controle	71
	5.5 Características de tracção	73
	5.6 Modos de andamento	78
CAPÍTULO 6	ACONTECIMENTOS E ESTADOS DISCRETOS	83
	6.1 Introdução	84
	6.2 Os comboios - estados e acontecimentos	84
	6.3 Duas classes de acontecimentos	85
	6.4 Principais acontecimentos e seus efeitos	87
	6.5 Execução dos acontecimentos	89

	6.6 Listas de acontecimentos do tipo II	92
	6.7 Inclusão de acontecimentos discretos no programa de simulação	94
CAPÍTULO 7	ESQUEMAS DE CONTROLE	102
	7.1 Introdução	103
	7.2 Descrição genérica do método utilizado	104
	7.3 A variável de comando	105
	7.4 Instruções de controle na versão actual do programa	106
	7.5 Comparação entre algumas instruções de controle	112
	7.6 Conclusões	113
CAPÍTULO 8	ESQUEMAS DE PROTECÇÃO	121
	8.1 Introdução	122
	8.2 Predicados de protecção local	123
	8.3 Estabelecimento e verificação dos predicados de protecção	125
	8.4 Programas de protecção	129
	8.5 Estabelecimento menos geral dos predicados de protecção	131
	8.6 Generalização dos mecanismos locais de protecção	132
	8.7 Protecção contra a aproximação excessiva de comboios na mesma via	133

	8.8 Sobre o método utilizado	134
CAPÍTULO 9	APLICAÇÕES	140
	9.1 Rede de teste	141
	9.2 Outras aplicações	147
CAPÍTULO 10	O PROGRAMA DA OPTIMIZAÇÃO DO MOVIMENTO	164
	10.1 Introdução	165
	10.2 Formulação do problema	166
	10.3 Métodos de ataque ao problema da optimização dos consumos	169
	10.4 Optimização dos atrasos	175
APÊNDICE A	Diagramas de dependências	181
APÊNDICE B	Estudo experimental das característi- cas eléctricas de uma locomotiva	193
APÊNDICE C	Algumas curvas características para as locomotivas U.T.E. - Si	208
APÊNDICE D	Implementação da lista de acontecimen- tos	210
APÊNDICE E	Descrição da linguagem usada nos pro- gramas de protecção	214

APÊNDICE F	Manual de utilização do programa de simulação	218
BIBLIOGRAFIA		262

### Principais notações utilizadas

- $N_t$  - Número de comboios actualmente existentes no sistema
- $X$  - Vector de estado
- $x_i$  - Posições dos comboios
- $v_i$  - Velocidades dos comboios
- $F_{t_i}$  - Força de tracção útil dos comboios
- $F_{r_i}$  - Forças de resistências e atritos por unidade de massa
- $M_i$  - Massas dos comboios
- $g$  - Aceleração da gravidade
- grad- Declive expresso em  $n/s^2$
- $Y$  - Matriz das admitâncias da rede eléctrica
- $Y'$  - Matriz das admitâncias com inclusão dos comboios
- $I$  - Vector das correntes (complexas) nos barramentos; no capítulo 5,  $I$  representa a corrente (em módulo) no pantógrafo
- $I_i$  - Correntes (complexas)
- $E$  - Vector das tensões (complexas) nos barramentos; no capítulo 5,  $E$  representa a tensão (em módulo) no pantógrafo
- $E_i$  - Tensões (complexas)
- $I_m$  - Corrente (módulo) nos motores

- $E_{ri}$  - Tensão (módulo) nos motores  
 F - Número de nós de alimentação da rede eléctrica  
 NF - Número total de nós fixos (incluindo os F nós de alimentação da rede)  
 N - Número total de nós eléctricos (variável)  
 $P_i + jQ_i$  - Potências (complexas) injectadas pelos comboios na rede  
 $\varphi_i$  - Esfasamento das correntes relativamente às tensões nos pantógrafos  
 (igual a  $\arg(I_i) - \arg(E_i)$ )  
 U - Vector de comando dos comboios  
 u - Variável de comando  
 T - Tempo (actual)  
 DT - Intervalo de discretização temporal  
 X0, V0, T0 - Posições, velocidades e tempos especificados nos horários  
 $N_i$  - Variáveis (inteiras) utilizadas nos programas de protecção.

Observação: no capítulo 5 considera-se o estudo dos comboios como cargas da rede eléctrica pelo que a convenção do sentido das correntes e potências difere da convenção utilizada no resto deste trabalho.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Objectivo do trabalho

A simulação em computadores digitais de sistemas reais levanta frequentemente problemas muito complexos sobretudo no que diz respeito à escolha do modelo adoptado como representação aproximada da realidade.

A escolha do modelo reveste diversos aspectos, nomeadamente

- a generalidade de aplicação
- o nível de detalhe representado
- as classes de fenómenos simulados.

As várias opções que se fazem devem ser guiadas não apenas em função da realidade mas também tomando em consideração os objectivos a atingir com a simulação, a qualidade dos dados disponíveis e as limitações computacionais existentes.

No presente trabalho descrevemos o conjunto de problemas e soluções adoptadas para a realização de um programa concreto de simulação no domínio da Engenharia cujo objectivo é simular a evolução dinâmica de um sistema constituído por um conjunto de comboios numa rede de caminho de ferro electrificada.

A complexidade deste programa pode ser inferida do conjunto de dados que se revelaram necessários para uma representação razoavelmente fiel e geral da realidade, e que podemos agrupar nas seguintes classes:

1) dados relacionados com a rede ferroviária: topologia da rede (linhas, cruzamentos, etc), declives, velocidades máximas

2) dados relacionados com a rede eléctrica: características de alimentação (nomeadamente da subestação) e da catenária

3) dados que descrevem as características dos vários tipos de comboios utilizáveis na rede em consideração (curvas características de tracção e do consumo eléctrico, massa, etc)

4) horários (ou conjuntos de objectivos a serem satisfeitos pelos comboios na rede)

5) métodos de controle utilizados (por um maquinista ou por um sistema automático eventualmente centralizado) nos comboios com o objectivo de satisfazer na medida do possível os horários

6) dados relativos aos sistemas de protecção utilizados com o fim de garantir a segurança em determinadas circunstâncias: acesso a "zonas críticas" (cruzamentos, entroncamentos), verificação de uma distância mínima entre comboios na mesma via, etc.

A complexidade do modelo impõe uma atitude estruturada na elaboração do programa com o fim de isolar os vários problemas e de os atacar com (relativa) independência. Esperamos que essa estrutura seja evidente na própria divisão em capítulos deste trabalho.

Embora nem todos os fenómenos importantes estejam modelados com grande detalhe no programa, pensamos que este trabalho pode ser útil em dois níveis diferentes:

1- como ferramenta para diversos estudos em redes de caminhos de ferro,

permitindo nomeadamente:

- a) análise instantânea do comportamento da rede eléctrica
- b) estudo dos horários e da possibilidade de serem cumpridos com determinados tipos de comboios
- c) dimensionamento dos componentes eléctricos de uma linha a electrificar e previsão dos consumos
- d) estudo do efeito (nos consumos e nos horários) de técnicas diversas de controle dos comboios.

Deve dizer-se, contudo, que algumas aplicações não necessitam da generalidade e sofisticação deste programa.

2- como um exemplo (sem dúvida imperfeito ) dos métodos utilizados para a definição dos modelos e estruturas de um programa de simulação relativamente complexo; neste contexto podemos descrever em linhas gerais o caminho seguido:

- a) — definição das estruturas e algoritmos fundamentais numa linguagem do tipo PASCAL
- b) — refinamentos sucessivos dos algoritmos e estruturas
- c) — codificação em FORTRAN (única linguagem disponível na altura em condições aceitáveis)
- d) — testes e correcções de erros.

## 1.2 Estrutura geral do trabalho

Começaremos no capítulo 2 por discutir os componentes básicos do sistema

(a rede ferroviária, a rede eléctrica e os comboios) e alguns aspectos gerais dos modelos escolhidos.

Podemos distinguir num sistema deste tipo uma evolução contínua e uma evolução discreta: a evolução contínua pode caracterizar-se pelas equações diferenciais que descrevem o movimento dos comboios acompanhadas de equações estáticas (da rede eléctrica e das características de tracção das locomotivas) que devem ser verificadas em cada instante; a formulação e solução destas equações será discutida respectivamente nos capítulos 3 e 4; devido ao carácter específico das equações de tracção (traduzidas em características de tracção) elas são tratadas separadamente no capítulo 5.

A evolução discreta do sistema é tratada no capítulo 6 em termos de "acontecimentos" que ocorrem em determinados instantes temporais (por exemplo a entrada de um novo comboio no sistema); alternativamente poderíamos usar uma linguagem de "processos" (criação, destruição, activação), assimilando cada comboio a um "processo" em interacção com o ambiente (as redes ferroviárias e eléctricas) e com os outros processos em curso; este seria certamente o método adoptado no caso de se utilizar como linguagem de programação o SIMULA.

Neste sistema podemos dizer que a causa de toda a evolução é o algoritmo de controle do movimento dos comboios, o qual recebe como objectivos a cumprir um conjunto de especificações fixadas nos horários; estes assuntos são tratados no capítulo 7.

As soluções utilizadas para a representação geral dos mecanismos de protecção são discutidas no capítulo 8 com base numa metodologia bastante próxima da que é normalmente adoptada (embora com menos generalidade) na análise de programas concorrentes e em especial dos Sistema de Exploração ([24],[25]). Os mé

todos apresentados baseiam-se na especificação de programas de protecção que são aplicáveis às várias situações que usualmente podem aparecer (tais como cruzamentos, entroncamentos, vias únicas e blocos de sinalização).

No capítulo 9 é referida a título exemplificativo uma aplicação do programa a um caso específico.

O importante e complexo problema da optimização do movimento dos comboios não faz parte dos objectivos a que nos propoemos nesta tese; todavia pa- receu-nos importante fazer algumas considerações gerais sobre os métodos numéricos de ataque a este problema (cap. 10).

Ao longo deste trabalho admitimos da parte do leitor um conhecimento básico de Tracção Eléctrica (ver [2] ), de Análise Numérica e das técnicas de programação.

### 1.3 Trabalhos anteriores

Existem já publicados diversos trabalhos relativos à simulação em redes de caminho de ferro embora se refiram normalmente a aspectos parciais e simplificados do problema; por exemplo podem ser feitos programas especialmente adaptados à análise dos horários (não considerando problemas de controle e de consumos) programas em que não se considera a rede eléctrica ([14]), etc.

Todavia, dentro do conhecimento do autor, existe apenas um trabalho publicado ([1]) onde se descreve um programa de simulação que engloba os aspectos mecânicos, eléctricos e de controle. O presente trabalho constitui uma extensão e uma generalização substanciais de [1] sobretudo no que diz res-

peito aos seguintes aspectos:

a) estrutura da rede ferroviária: o programa é aplicável não apenas a uma linha ferroviária mas a uma rede arbitrária (que é representada por um grafo dirigido)

b) mecanismos de controle: introduzimos como dados "programas de controle" consistindo em instruções para os comboios capazes de simular vários métodos de comando; assim, como um só programa, podem ser testados diversos tipos de controle

c) mecanismos de protecção: a generalidade da rede ferroviária que pode ser simulada impõe que se criasse um método flexível de simular protecções; isso foi conseguido com os chamados "programas de protecção"

d) acontecimentos discretos: é explicitada no programa a noção de acontecimento discreto, o que permite unificar as estruturas de informação, tornando o programa mais simples e flexível

e) aplicação a redes eléctricas de diferentes tipos: diferentes frequências e existência de um ou mais pontos de alimentação da catenária.

#### 1.4 Trabalhos futuros; o problema de optimização

A automatização crescente nas redes de caminhos de ferro vai exigir programas de simulação e optimização cada vez mais complexos que deverão reflectir a hierarquia de controle utilizada em tempo real. O conjunto de objectivos a atingir numa exploração de uma rede de caminhos de ferro é variado e complexo, envolvendo nomeadamente:

- 1) a fixação prévia dos percursos, horários e comboios com vista a uma boa qualidade de serviço
- 2) a satisfação dos horários em tempo real
- 3) optimização dos consumos de energia e do desgaste de material
- 4) o sequenciamento óptimo dos comboios em zonas protegidas (cruzamentos, entroncamentos, etc.)
- 5) o controle (sub) óptimo ao nível dos comboios
- 6) o conjunto de acções a serem tomadas em casos excepcionais como avarias, acidentes, atrasos excessivos, etc.

As soluções adoptadas envolverão uma hierarquia de controle que poderá ser constituída pelos seguintes níveis:

- controle geral dos horários, comboios em circulação, etc
- controle regional encarregado de receber ordens de controle geral fabricando conjunto de instruções enviadas por telecomando para os comboios por forma a serem satisfeitas de forma sub-óptima as ordens recebidas, considerando em particular os objectivos referidos em 2), 3) e 4).
- controle local nos comboios que recebem ordens (por exemplo, velocidades a cumprir) do controle regional e determinam os comandos apropriados para os motores, travões, etc.

Os computadores e microprocessadores serão extensivamente utilizados ([16]) com vista à automatização completa do controle e à simulação (em tempo real ou não) de estratégias de controle. Neste contexto o presente trabalho representa uma pequena contribuição, especialmente preocupada com a análise da

rede eléctrica.

É importante em trabalhos futuros, desenvolver e melhorar vários aspectos do programa de simulação efectuado, nomeadamente:

— aperfeiçoar os algoritmos de controle, dando passos no sentido da optimização, em particular utilizando esquemas de síntese de comando óptimo ([20])

— fazer estudos comparativos entre o modelo utilizado e outros modelos possíveis (por exemplo, incorporando a hipótese simplificativa de admitir que toda a catenária se encontra ao mesmo potencial); testar os diversos modelos a partir da realização de medições experimentais apropriadas

— aperfeiçoar os modelos das características de tracção

— facilitar o uso do programa através da utilização de métodos interactivos em terminais gráficos evoluídos.

Uma condição necessária para prosseguir estes desenvolvimentos é a disponibilidade de facilidades computacionais apropriadas.

## CAPÍTULO 2

### COMPONENTES DO SISTEMA

## 2. OS COMPONENTES DO SISTEMA

Neste capítulo procuraremos responder às seguintes perguntas

- 1) O que deve ser incluído no sistema simulado?
- 2) Como deve ser estruturada e representada a informação?

### 2.1 O que incluir no sistema?

"Devemos incluir na simulação todos os fenómenos que são relevantes relativamente ao objectivo pretendido e aos erros toleráveis"; esta afirmação traz o facto de a relevância de fenómeno ser relativa a um certo objectivo; por exemplo, a produção de harmónicos na rede eléctrica pode ser muito importante do ponto de vista das interferências nas telecomunicações mas pode ser desprezável ao nível energético.

Uma das dificuldades em responder à pergunta referida é o desconhecimento prévio das influências (e dos erros introduzidos pela não consideração) de certos fenómenos. Por vezes, um cálculo simples leva a uma estimativa da ordem da grandeza da influência de certos tipos de fenómenos que é suficiente para uma opção clara. Outras vezes é difícil fazer uma opção justificada (independente, por exemplo, dos gostos ou deformações profissionais).

No presente trabalho, procurou-se incluir na simulação um conjunto de fenómenos equilibrados mas é evidente que da apreciação dos resultados deste programa por técnicos especializados poderão resultar sugestões para modificação do programa.

De tudo isto resulta a necessidade de o programa de simulação ser flexível-

vel e estruturado para que muitas das "modificações" sejam apenas alterações dos dados (flexibilidade) e de modo que as alterações ao código e estruturas de informação do programa sejam relativamente simples (estruturação e clareza).

Podemos agrupar os fenómenos excluídos da simulação em dois níveis básicos:

- um nível "horizontal" relativo à extensão do sistema simulado
- um nível "vertical" relativo à profundidade da análise (ou detalhe de representação) dos objectos simulados.

Para não deixar o que se disse numa forma demasiado abstracta vamos exemplificar com alguns casos concretos os tipos de opções que foram efectuadas.

a) Devemos modelar um ou mais troços de via electrificada? (isto é, um ou mais subgrafos electricamente conexos da rede?)

É claro que, se modelarmos apenas o troço (com possíveis ramificações) de via electrificada alimentado por uma determinada subestação, a rede eléctrica é mais simples, mas somos obrigados a fornecer ao programa os instantes e velocidades dos comboios que entram nesse troço, os quais estão sujeitos a variações mais ou menos aleatórias; por outro lado, se incluirmos redes ferroviárias relativamente complexas (com vários troços electrificados), a simulação do movimento dos vários comboios pode ser feita com maior realismo.

O esquema utilizado permite a simulação de sistemas podendo englobar um ou mais troços (subgrafos) electricamente independentes cada um dos quais alimentado por uma ou mais subestações.

b) Devemos modelar as estações?

As estações não são modeladas como objectos independentes mas uma repre

sentação aproximada é obtida pelo facto de nos horários dos comboios haver a possibilidade de dois tipos de paragens: (1) na via principal, mantendo-se o comboio no ramo ferroviário respectivo e (2) numa derivação lateral (abandonando o ramo ferroviário).

Além disso, o utilizador poderá incluir um "programa de protecção" que limita o número máximo de composições num certo ponto de paragem.

c) As variações da massa dos comboios devem ser simuladas?

O mesmo comboio pode ter flutuações significativas na sua massa ao longo do seu percurso (variação do número de passageiros, do número de carruagens, etc). Por isso, se incluiu nos "horários" a possibilidade de um comboio mudar de massa segundo valores dados (isto é, não se fez qualquer simulação estocástica dos fluxos de passageiros e mercadorias).

d) A que nível são simulados os fenómenos de tracção das locomotivas?

O modelo usado é do tipo "entrada-saída" e é baseado exclusivamente nas características (famílias de curvas) fornecidas pelos fabricantes. Não é objetivo deste trabalho simular os fenómenos internos de tracção.

Diversos valores limites (como, por exemplo, força de tracção máxima para que não haja deslizamento das rodas nos carris) permitem representar de forma aproximada alguns fenómenos não desprezáveis.

e) Como limitar a separação entre dois comboios na mesma linha?

Fixou-se que nenhum comboio podia distanciar do seguinte (à sua frente) menos que uma certa distância que é dada (se isso acontecer ele trava).

Alternativamente, poder-se-iam simular à custa de programas de protec-

ção os chamados "blocos de sinalização" ou utilizar métodos mais sofisticados de controlar o distanciamento entre comboios.

Poderíamos continuar com mais e mais exemplos. O importante é observar que há geralmente várias alternativas que se põem e que é perfeitamente possível que dois programas razoáveis de simulação sejam substancialmente diferentes no modo de representar os fenómenos importantes.

## 2.2 Estruturação da informação

Antes de começar a descrever os componentes do sistema é conveniente ter uma ideia geral do funcionamento do programa de simulação; para isso reparemos na figura 2.1.

Definimos:

horário - conjunto de instruções a serem respeitadas por um certo comboio; nesta interpretação há uma generalização do conceito de horário o qual pode incluir instruções do tipo:

"mantenha a velocidade de ... até ao ponto ... " ou "pare no instante ... no ponto ... e aumente a massa para ...". Por isso também designamos o horário por programa de controle.

controle - algoritmo que, a partir dos objectivos a atingir (definidos pelo horário) e do estado actual do sistema determina os valores das variáveis de comando apropriadas.

protecções - algoritmos que verificam a satisfação ou não das várias

restrições de protecção, introduzindo se necessário alterações nas variáveis de comando.

simulação - algoritmo que "integra" as equações do sistema, usando os valores das variáveis de comando fixadas pelo controle e protecções.

Uma descrição mais completa destas relações pode encontrar-se no capítulo 7.

Agora, podemos começar a descrever de uma forma hierárquica os objectos do sistema.

Num primeiro nível o sistema é constituído por

- uma rede ferroviária (fixa)
- um conjunto de comboios (variável)

A rede ferroviária - é (a este nível) um grafo dirigido, isto é um conjunto de nós e um conjunto de ramos orientados cada um dos quais liga dois nós.

O acesso ao sistema será essencialmente efectuado pelos ramos do grafo; cada ramo (como veremos a seguir) tem um conjunto de propriedades (nós eléctricos, declives, estações, etc.) não sendo portanto um objecto elementar.

Um caminho é uma sequência de ramos do grafo sendo a extremidade de cada um coincidente com a origem do seguinte.

Na figura 2.2 esquematiza-se a rede ferroviária simples juntamente com a sua representação em forma de grafo dirigido. Note-se que (a este nível) são ignoradas as propriedades de cada ramo.

Alguns caminhos possíveis são

1,2

3

1,6,5,2

1,2,3,4

Observemos ainda que a porção de via única foi simulada por dois ramos dirigidos (5 e 6) e que deverá ser implementado um predicado de protecção do tipo:

(número de comboios em 5) = 0  $\vee$  (número de comboios em 6) = 0 para evitar catástrofes evidentes.

### Os comboios

Em cada instante haverá um certo número de comboios na rede. Os comboios num certo ramo da rede formam uma fila à qual estão associados dois operadores básicos:

- (1) entrada de um elemento na cauda da fila
- (2) saída de um elemento pela frente da fila.

Além destas operações (correspondentes à evolução dos comboios ao longo dos caminhos) há outras menos frequentes como, por exemplo, a saída de um certo comboio a meio de uma fila (um comboio que pára numa estação e sai da rede ferroviária).

A cada comboio está associado um estado constituído por uma posição (ramo e posição relativa ao início do ramo) e por uma velocidade.

O acesso aos comboios no sistema é efectuado através da fila de comboios no ramo em que se encontram.

Podemos agora detalhar a estrutura dos ramos da rede e dos comboios. Vamos ver que a rede eléctrica aparece como uma sub-estrutura da rede ferroviária.

### Estrutura dos ramos da rede

Na figura 2.3 detalhamos um pouco mais a estrutura de cada ramo da rede ferroviária. Escolhemos uma descrição do tipo dos "RECORD" da linguagem PASCAL ([27]) por nos parecer clara e concisa (não se trata da sintaxe exacta do PASCAL mas de uma adaptação "livre"). Os nomes usados diferem dos que são usados no programa (o qual foi escrito em FORTRAN).

Esperando que a figura seja suficientemente clara, fazemos apenas algumas observações sobre a rede eléctrica e sobre as protecções.

A rede eléctrica tem alguns nós fixos e outros móveis (comboios). São os primeiros estão descritos directamente na estrutura de RAMO. Um dos nós fixos é o alimentador, isto é, o ponto da rede que liga a uma subestação cujo transformador é tipicamente alimentado por uma linha curta que liga a um ponto da rede de alta tensão (60 Kv por exemplo). Noutros casos a situação será substancialmente diferente (o que ocorre nas alimentações de corrente contínua e de frequências fraccionárias).

De qualquer forma o(s) ponto(s) da catenária alimentado(s) pode(m) ser caracterizado(s) por uma corrente de curto circuito (complexa) e por uma admittance interna (complexa). Estas grandezas podem ser pré-calculadas a partir das características do transformador da linha e do ponto de ligação à rede de alta tensão.

Nos outros nós fixos da catenária não há correntes injectadas (trata-se de extremidades da catenária ou de barramentos da ligação em paralelo de vias múltiplas com vista a uma melhor distribuição das correntes).

A cada nó fixo está associado um número e, entre dois nós fixos, é conhecida a impedância quilométrica da catenária (a susceptância quilométrica

não foi considerada por influir pouco nos resultados mas a sua inclusão no programa é muito simples e está prevista).

As protecções nos ramos representam um conjunto de pontos aos quais estão associados programas de protecção que os comboios "executam" nesses locais (estas protecções têm a ver, por exemplo, com entroncamentos de vias).

### Estrutura dos comboios

Cada comboio pertence a um certo tipo genérico e a sua estrutura depende em parte desse tipo. A figura 2.4 ilustra este facto, representando dois tipos principais ELECTR e DIESEL (eléctrica e "diesel") de locomotivas.

Cada comboio particular tem um número externo associado (para identificação), um número interno para efeitos de acesso (indexação) e, se for eléctrico, tem ainda um número eléctrico (número do nó respectivo na rede) o qual pode variar ao longo da simulação.

O estado de cada comboio tem uma componente discreta e uma componente contínua (localização e velocidade).

A estrutura dos ramos e dos comboios reflete apenas de forma aproximada as estruturas respectivas no programa de simulação.

### Estrutura geral do programa

Na figura 2.5 estão representadas as principais operações e estruturas de informação do programa. As operações estão representadas dentro de figuras arredondadas e as estruturas de informação dentro de rectângulos. Um ramo dirigido de A para B (tanto A como B podem ser operações ou estruturas de infor

mação) significa em termos genéricos que B "usa" A.

Assim, por exemplo, a integração das equações dinâmicas exige que se resolvam primeiro as equações eléctricas e mecânicas nesse instante de tempo, fornecendo o estado actualizado dos comboios.

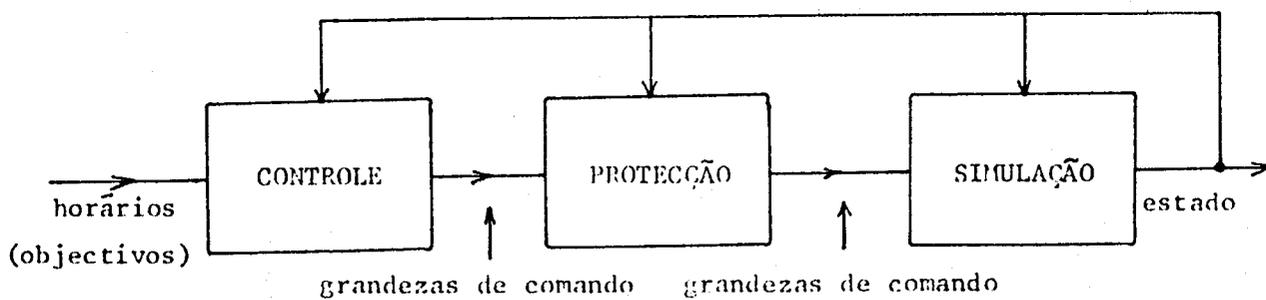


Fig. 2.1 Esquema abstracto do sistema.

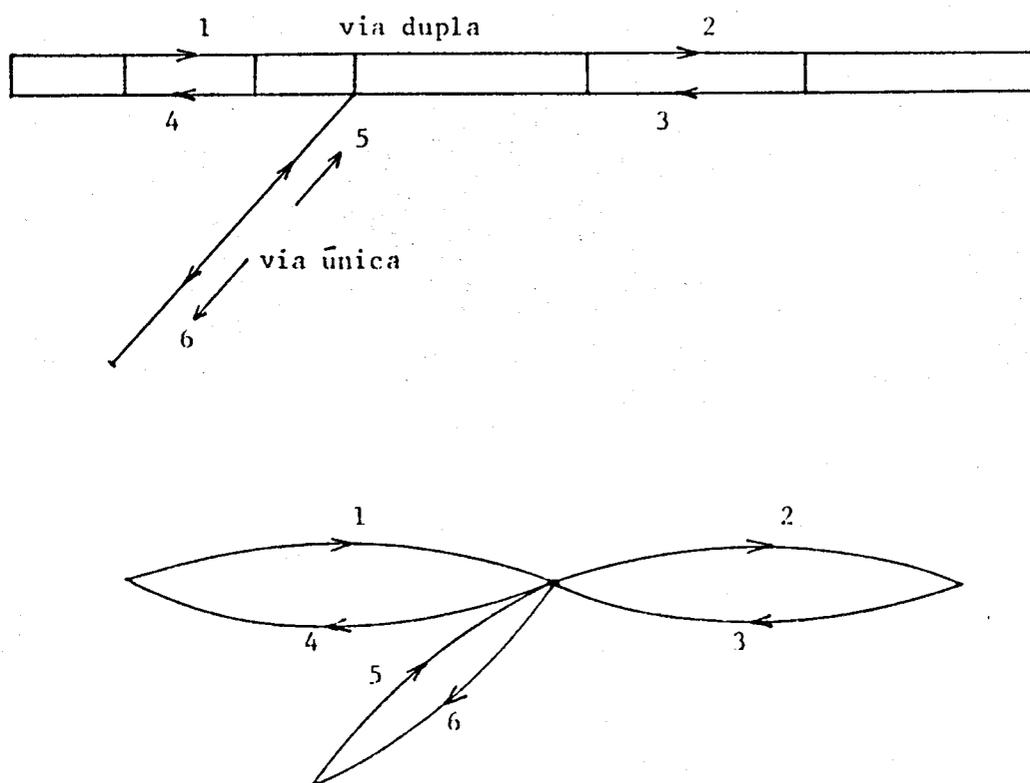


Fig. 2.2 Exemplo de rede e da sua representação na forma de gráfico.

```

TYPE   RAMO = RECORD
        NÓ DE PARTIDA, NÓ DE CHEGADA : NÓS ;
        COMPRIMENTO : REAL ;
        DECLIVE: FUNCTION (X:REAL ∈ [0,COMPRIMENTO] ): REAL;
        VELOCIDADE MÁXIMA: FUNCTION (X:REAL ∈ [0,COMPRIMENTO] ): REAL;
        FILA: SEQUÊNCIA DE ↑COMBOIO (estrutura de "QUEUE");
        REDE ELÉCTRICA: SEQUÊNCIA DE RECORD
                LOCALIZAÇÃO: REAL ∈ [0, COMPRIMENTO] ;
                NÓ ELÉCTRICO : INTEGER; (NÓ FIXO)
                IMPEDÂNCIA QUILOMÉTRICA: COMPLEX;
                (até ao nó seguinte)
                CASE TIPO DO NÓ OF
                        ALIMENTADOR: (CORRENTE C. C.:COMPLEX;
                                ADMITÂNCIA INTERNA: COMPLEX)
                        OUTROS NÓS FIXOS : ( )
                END;
        PROTECÇÕES: SEQUÊNCIA DE RECORD
                LOCALIZAÇÃO: REAL ∈ [0, COMPRIMENTO] ;
                PROGRAMA PROTECÇÃO : ↑PROGRAMA
                END
        END;
VAR   REDE FERROVIÁRIA : ARRAY [1.. NUM. DE RAMOS ] OF RAMO

```

Fig. 2.3 Estrutura da rede ferroviária e de cada um dos ramos

```

TYPE   COMBOIO = RECORD
          NÚMERO EXTERNO : INTEGER;
          ESTADO: RECORD
              ESTADO DISCRETO: (ACTIVO, PARADO, PASSIVO, FINAL);
              RAMO EM QUE SE ENCONTRA: ↑RAMO;
              POSIÇÃO REL. AO INÍCIO DO RAMO: REAL;
              VELOCIDADE: REAL
          END;
          MASSA: REAL;
          FORÇA TRACTIVA: REAL;
          CAMINHO DO COMBOIO: ↑CAMINHO;
          OBJECTIVOS: RECORD
              CONTROLADO: BOOLEAN; (COMANDO JÁ ESPECIFICADO)
              HORÁRIO DO COMBOIO: ↑HORÁRIO;
              ORIGEM DOS TEMPOS: REAL (BASE DO TEMPO PARA O
                  HORÁRIO RESPECTIVO)
          END;
          FORÇA RESISTENTE: REAL FUNCTION; (FUNÇÃO DA VELOCIDADE);
          FORÇA DE TRAVAGEM MÁXIMA: REAL;
          .....
          .....
          CASE TRACÇÃO: TIPO DE LOCOMOTIVA OF
              ELECTR: (COMANDO: 1..30; (GRADUADOR DE COMANDO)
                  FORÇA TRACTIVA E1: REAL FUNCTION
                  (FORNECE A FORÇA TRACTIVA COMO FUNÇÃO DO
                  COMANDO, DA VELOCIDADE E DA TENSÃO);
                  CONSUMO: REAL FUNCTION);
              DIESEL: (COMANDO1: REAL
                  FT: REAL FUNCTION (DO COMANDO E VELOCIDADE)
              .....
              .....
          END;
          END;
          VAR COMBOIOS: ARRAY[1..NCOMB:MAX] OF COMBOIO;

```

Fig. 2.4 Estrutura dos comboios

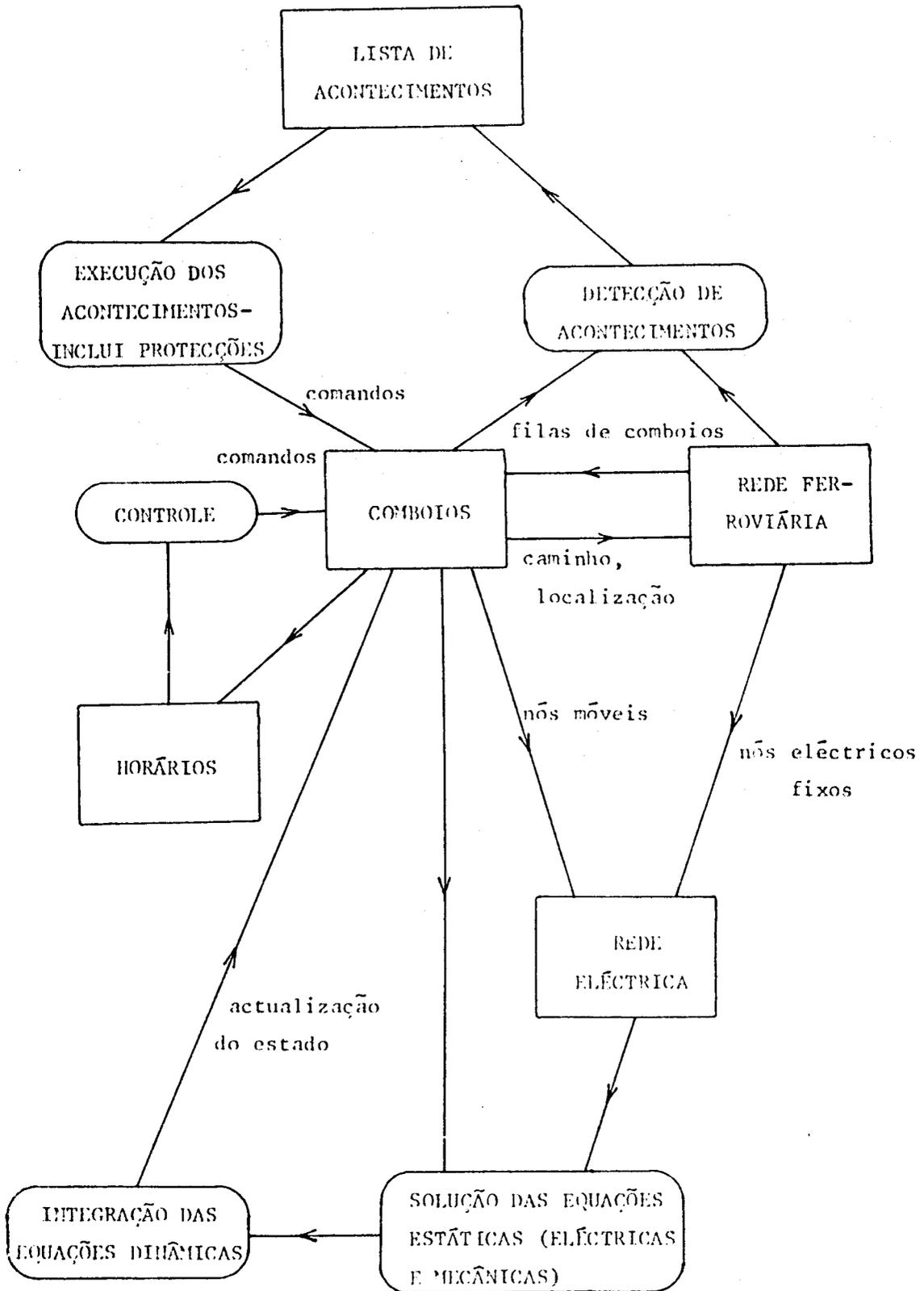


Fig. 2.5 Principais estruturas de informação e operações no programa de simulação.

## CAPÍTULO 3

### EQUAÇÕES DO SISTEMA

### 3. EQUACÕES DO SISTEMA

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo escreveremos as equações básicas que descrevem o modelo matemático do sistema em consideração o qual envolve vários aspectos, nomeadamente:

- 1) a caracterização da estrutura do sistema e dos seus componentes
- 2) a caracterização estática do sistema através das equações estáticas
- 3) a escolha das variáveis de estado e a caracterização dinâmica do sistema pelas equações de estado (ou equações dinâmicas).

É fundamental manter presente a ideia de que o modelo matemático escolhido não depende apenas do sistema físico em consideração, mas também dos objectivos a atingir com a simulação, do grau de exactidão pretendido, da capacidade computacional disponível, etc.

Começaremos por caracterizar o estado discreto e contínuo do sistema, depois trataremos das equações de estado e das equações estáticas (em particular das equações da rede eléctrica).

#### 3.2 O estado do sistema

Da observação do sistema resulta que existem dois tipos de "cons-

tantes de tempo": as mecânicas que têm a ver com o movimento dos comboios e as eléctricas relacionadas com os fenómenos eléctricos na rede de alimentação. Como as primeiras são bastante superiores às segundas (isto é decorrem bastantes ciclos eléctricos durante uma mudança significativa do estado mecânico dos comboios) podemos caracterizar a rede eléctrica pelas correntes e tensões complexas (transformadas de Steinmetz) e encará-la como uma rede eléctrica habitual cuja carga e estrutura varia lentamente no tempo. Estas considerações levam-nos a incluir as tensões e correntes nas variáveis estáticas ficando as variáveis de estado reduzidas à caracterização da posição e velocidade dos comboios.

Ao pretender descrever o modelo matemático do sistema devemos observar que a estrutura do sistema muda no tempo. Por exemplo, o número de comboios activos pode variar no tempo.

Desta forma o estado do sistema pode ser descrito por dois tipos de variáveis:

1 - as variáveis discretas que representam quantidades que são constantes entre acontecimentos discretos consecutivos nos quais pode haver uma transição brusca de seu valor

2 - as variáveis dinâmicas (ou variáveis de estado) que, durante os intervalos de tempo em que as variáveis discretas se mantêm, variam continuamente no tempo segundo equações de estado determinadas.

Como exemplo de variáveis discretas no modelo matemático utilizado temos o número de comboios no sistema, o ramo em que se encontra cada comboio, o estado discreto (activo, passivo, parado, fora da rede) de cada comboio e a sua massa.

Como exemplo das segundas temos a posição de um comboio dentro de um certo ramo e a sua velocidade.

A figura 3.1 pretende relacionar de forma simplificada estes dois tipos de variáveis.

Devemos notar que o facto de uma variável ser discreta ou contínua pode depender do modelo matemático adoptado para a representação do sistema.

Os fenómenos discretos serão tratados no capítulo 6.

Depois destas observações chegamos ao seguinte vector de estado para o sistema

$$\left[ x_1, v_1, x_2, v_2, \dots, x_{N_t}, v_{N_t} \right]^T$$

onde  $N_t$  é o número de comboios no sistema

$x_i$  ( $1 \leq i \leq N_t$ ) é a distância do comboio  $i$  à origem do ramo onde se encontra

$v_i$  ( $1 \leq i \leq N_t$ ) é a velocidade do comboio  $i$ .

### 3.3 As equações dinâmicas do sistema

Tendo em consideração as várias forças a que estão sujeitos os comboios obtemos a seguinte forma básica para as equações de estado:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = \frac{1}{M_i} F_{t_i} - \text{grad}(x_i) - F_{r_i}(v_i) \end{cases} \quad (3.1)$$

para  $i = 1, 2, \dots, N_t$

onde  $M_i$  é a massa da composição  $i$ ,  $F_{t_i}$  a força de tracção útil,  $\text{grad}(x_i)$  é o declive no ponto  $x_i$  medido em unidades de aceleração (isto é o simétrico da componente de  $\vec{g}$  segundo a direcção do deslocamento) e  $F_{r_i}(v_i)$  é a soma das forças de atrito, por unidade de massa, à velocidade  $v_i$ .

Sendo as funções  $\text{grad}(x_i)$  e  $F_{r_i}(v_i)$  conhecidas e considerando como entradas no sistema as forças  $F_{t_i}$ , estas  $2N_t$  equações descrevem a evolução temporal do vector de estado.

### 3.4 Aspecto global das equações

Estamos agora em posição de relacionar as equações de estado e as equações estáticas do sistema.

Para isso observemos a fig. 3.2 onde estas várias relações estão representadas.

Nesta figura podemos distinguir os 3 conjuntos de equações que caracterizam o sistema:

(1) as equações dinâmicas (3.1) que determinam a evolução do estado do sistema; trata-se de equações diferenciais que são lineares para o tipo de entrada escolhido (forças de tracção úteis dos comboios)

(2) as equações da rede eléctrica que, no modelo utilizado, são equações estáticas; os dados para estas equações são: a estrutura da rede (que depende da posição dos comboios), as cargas definidas pelos vários comboios e as características das subestações alimentadoras; os resultados destas equações são as correntes absorvidas e as tensões nos vários nós; dependen-

do da caracterização das cargas, estas equações podem ser ou não lineares

(3) as equações (estáticas) que modelam as características de tracção dos comboios; trata-se em geral de equações não lineares e relativamente complicadas que aproximam o conjunto de curvas características das locomotivas; como dados para estas equações podemos ter: a velocidade do comboio, a tensão no pantógrafo e o valor da variável de comando; como resultados obtemos: a força de tracção e o "consumo" do comboio.

Na figura 3.2 podemos ver as inter-relações entre os vários tipos de equações e verificar a necessidade de soluções iterativas.

Nesta figura, por simplicidade de representação não se explicitaram alguns factos, nomeadamente:

(a) as equações dinâmicas dependem do declive que é função da posição  $x_i$

(b) nas equações dinâmicas entram também as forças de resistência e atrito que dependem essencialmente da velocidade

(c) há um conjunto de relações de protecção que é necessário estabelecer, o que condiciona (entre outros factores) os valores possíveis do vector de estado.

### 3.5 Formulação das equações eléctricas

A rede eléctrica tem normalmente a seguinte constituição:

(i) uma ou mais subestações de alimentação constituídas essencial-

mente (para o caso da frequência industrial de 50 Hz) por um transformador cujo secundário liga a um barramento de alimentação da catenária e cujo primário liga, através de uma linha de alta tensão à rede alimentadora

(ii) outros nós fixos sem consumo de energia constituídos pelas junções de catenárias (por exemplo bifurcações e pontos de colocação em paralelo)

(iii) nós móveis localizados nos pontos em que os pantógrafos dos comboios tocam a catenária

(iv) catenária

(v) eventualmente outros componentes tais como transformadores para alimentações auxiliares e transformadores "booster" ao longo das linhas

Os pontos de alimentação da catenária podem ser modelados por uma corrente (complexa) de curto-circuito e por uma admitância interna (complexa e em geral predominantemente reactiva); é evidente que outras caracterizações equivalentes podem ser obtidas. Assim, aqueles valores devem ser inicialmente calculados a partir das características conhecidas da subestação e da sua alimentação. Desta forma, estes nós são modelados por um bipolo linear como representado na figura 3.3

Os nós fixos sem consumo de energia são caracterizados pelo facto de não injectarem qualquer corrente na rede ( $I_i=0$ ). Os nós móveis podem ser caracterizados de vários modos; por exemplo:

- a) por uma determinada corrente complexa injectada
- b) por uma potência (complexa) consumida
- c) por uma admitância (complexa)

Cada uma destas escolhas possíveis sugere um modo de caracterização da rede eléctrica que poderá ser mais ou menos vantajoso (eficiência e flexibilidade) uma vez integrado nos cálculos globais. Neste capítulo limitá-nos-emos a formular estas várias alternativas (que não são exaustivas) e no capítulo 4 escolheremos uma delas.

#### a) Caracterização pelas correntes injectadas

Hipótese: são conhecidas as correntes injectadas pelos barramentos de alimentação na rede e, de uma forma aproximada, em cada iteração, as correntes (em módulo e esfasamento) que os vários comboios "injectam" na rede.

Se incluirmos na matriz das admitâncias  $Y$  a admitância interna dos barramentos de alimentação obtemos a seguinte formulação para as equações eléctricas:

Sendo dado:

$Y$  matriz das admitâncias de  $N$  por  $N$

$$I = [I_1, \dots, I_F, \dots, I_{NF}, \dots, I_N]^T$$

$N$  é o número total de nós eléctricos

$I_i$  ( $1 \leq i \leq F$ ) são as correntes (complexas) de curto-circuito nos  $F$  barramentos de alimentação (conhecidas)

$I_i$  ( $F < i \leq NF$ ) são as correntes nulas relativas aos  $NF-F$  barramentos fixos de consumo nulo

$I_i$  ( $NF < i \leq N$ ) são as correntes (complexas) injectadas pelos comboios na rede,

determinar  $E = [E_1, \dots, E_N]^T$ , vector das tensões complexas a partir do sistema:

$$YE = I$$

onde, para os comboios,  $|I_i|$  e  $\arg(E_i) - \arg(I_i)$  são conhecidos em cada iteração e  $I_i$  é conhecido para os outros nós.

Podemos observar que a fixação de  $\arg(E_i) - \arg(I_i)$  para os comboios introduz uma não-linearidade nas condições.

#### b) Caracterização pelas potências complexas dos comboios

Hipótese: para os comboios  $P_i$  e  $Q_i$  (potências activas e reactivas injectadas na rede) são conhecidas de uma forma aproximada em cada iteração.

Considerando a mesma matriz  $Y$  que no caso a) temos a seguinte formulação das equações eléctricas:

Sendo dado:

a matriz  $Y$ ;

$I_i$  ( $1 \leq i \leq F$ );

$I_i = 0$  ( $F < i \leq NF$ );

$E_i I_i^*$  ( $NF < i \leq N$ ) =  $P_i + jQ_i$ , potências complexas injectadas pelos vários comboios na rede,

determinar o vector das tensões  $E$  que satisfaça aos dados e seja solução do sistema

$$YE = I$$

Trata-se de um problema não linear nas condições, tal como o caso a), que se assemelha aos problemas clássicos de fluxo de cargas. A semelhança pode ser total se formularmos as condições dos barramentos alimentadores em termos de potências complexas especificadas (em cada iteração); todos os nós são então do tipo PQ.

c) Caracterização através das admitâncias complexas dos comboios

Hipótese: Em cada iteração conhecemos aproximadamente as admitâncias complexas dos comboios. Neste caso obtemos a seguinte formulação das equações eléctricas:

Sendo dado:

$Y'$  a matriz das admitâncias (N por N), diferindo da matriz  $Y$  dos casos c) e b) por incluir também as admitâncias dos comboios; desta forma  $Y$  e  $Y'$  diferem em geral nos elementos da diagonal principal de índices  $NF+1, NF+2, \dots, N$

$I_i$  ( $1 \leq i \leq F$ )

$I_i$  ( $F < i \leq NF$ ) correntes nulas

$I_i$  ( $NF < i \leq N$ ) correntes nulas; observemos que as correntes que os comboios injectam na rede são nulas porque nesta formulação os comboios são interiores à rede (estão incluídos em  $Y'$ ); o vector das correntes toma a forma  $I' = [I_1, \dots, I_F, 0, \dots, 0]^T$ ,

determinar o vector das tensões  $E$ , solução do sistema

$$Y'E = I'$$

onde  $I'$  e  $Y'$  são conhecidos.

Concluimos que há vários graus de liberdade na formulação das equações eléctricas, nomeadamente no que respeita à inclusão ou não dos comboios na matriz das admitâncias e à caracterização das suas cargas.

Outro problema distinto da solução das equações é a construção da matriz das admitâncias durante a evolução do sistema por forma a reflectir a

evolução da topologia da rede. Esta questão será tratada no capítulo 6.

### 3.6 Equações de tracção (características de tracção)

Em princípio, as características fornecidas pelos construtores ou resultantes de ensaios permitam resolver o seguinte problema (que é o único que interessa ao nível de simulação a que estamos a trabalhar):

Sendo dado:

a velocidade do comboio

a tensão no pantógrafo

a variável de comando (por exemplo o ponto de um graduador),

calcular:

a força de tracção (que entra nas equações dinâmicas)

o consumo (por exemplo corrente no pantógrafo e factor de potência ou potências activa e reactiva).

Este problema será tratado no capítulo 5 onde descreveremos o modelo usado para um tipo particular de comboio.

Conforme se refere no capítulo 7, há uma certa liberdade na escolha da variável de comando, pois podemos escolher variáveis mais próximas dos comandos físicos (posição do graduador, por exemplo) ou mais próximas dos objectivos a atingir (força pretendida, por exemplo).

Esta última hipótese requer algum processamento adicional devido às restrições nos valores das grandezas (grandezas discretas e limitadas) mas oferece também algumas vantagens (simplificação do controle e das equações

dinâmicas).

Sem entrar em detalhe, observemos na figura 3.4 o relacionamento (diagrama de dependências) das várias grandezas num caso em que a variável de comando é uma força de tracção pretendida. No gráfico cada nó representa uma variável e, se a um nó  $X$  confluem arcos  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , isto significa que as variáveis  $X_1, \dots, X_k$  são usadas para calcular  $X$ ; as variáveis de partida são aquelas que não são apontadas por qualquer arco.

### 3.7 Algumas aproximações efectuadas na formulação das equações

Referem-se a seguir, as aproximações mais significativas implícitas nos modelos usados:

(i) nas equações dinâmicas

a) - não entramos de uma forma explícita com a resistência que a curvatura da via oferece ao movimento; todavia é possível entrar em conta com este fenómeno, de uma forma aproximada, modificando a função que dá o declive em cada ponto ( $\text{grad}(x)$ ); desta forma duas vias paralelas, percorridas em sentidos contrários terão em geral declives compensados que não são simétricos.

b) - utilizamos uma dependência das resistências e atritos com a velocidade dos comboios do tipo representado na figura 3.5; é todavia muito fácil alterar esta função por forma a traduzir comportamentos mais complexos.

c) - o comprimento não nulo dos comboios causa uma "filtragem" do declive efectivo que não foi levada em consideração (ver figura 3.6);

o modelo de "massas pontuais" utilizado não introduz erros apreciáveis para comboios de comprimentos não muito longos

(ii) nas equações da rede eléctrica

a) - não foram considerados os transformadores auxiliares que por vezes existem em certos pontos da linha (a sua inclusão no modelo da rede eléctrica não é difícil)

b) - considera-se que, sob o ponto de vista de alimentação de energia apenas o termo fundamental (50 Hz) tem importância

c) - os dados quanto à impedância quilométrica da catenária são normalmente valores apenas aproximados devido à dificuldade de os medir com precisão.

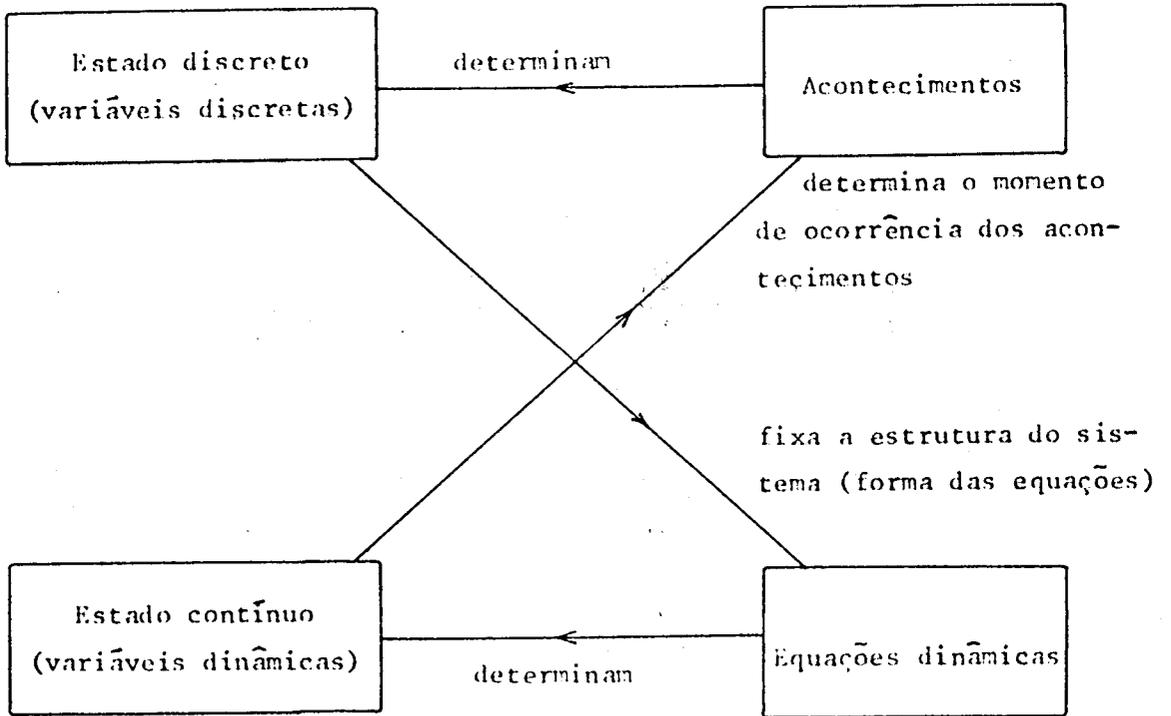
(iii) nas características de tracção

a) - o escorregamento das rodas motrizes nos carris é modelado apenas através de um limite na força de tracção admissível

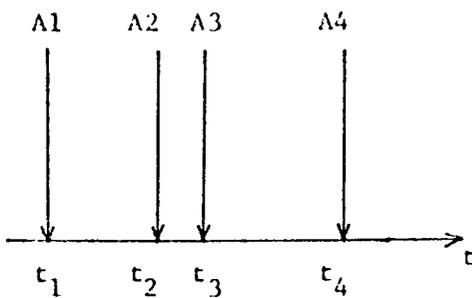
b) - o pequeno valor da massa inercial dos motores e transmissões levou à sua não inclusão nas equações

c) - os dados fornecidos pelos fabricantes (curvas características) são muitas vezes insuficientes o que leva à necessidade de, a partir deles, por métodos aproximados deduzir as características que faltam.

As aproximações referidas podem ser corrigidas, uma vez que se disponha de dados mais pormenorizados e desde que se justifique a sua inclusão. Apenas nos casos (i) c) e (ii) b) seriam necessárias alterações importantes no programa de simulação, pois envolvem modificações estruturais (e não apenas paramétricas) no modelo.



I



- $A_1, A_2, A_3, A_4$ : acontecimentos;
- em  $t_1, t_2, t_3, t_4$ : transições discretas;
- em  $]t_1, t_2[$ ,  $]t_2, t_3[$ ,  $]t_3, t_4[$ : evolução contínua;

II

Fig. 3.1 Relações entre os fenômenos discretos e contínuos; I - diagrama de influências; II - representação temporal.

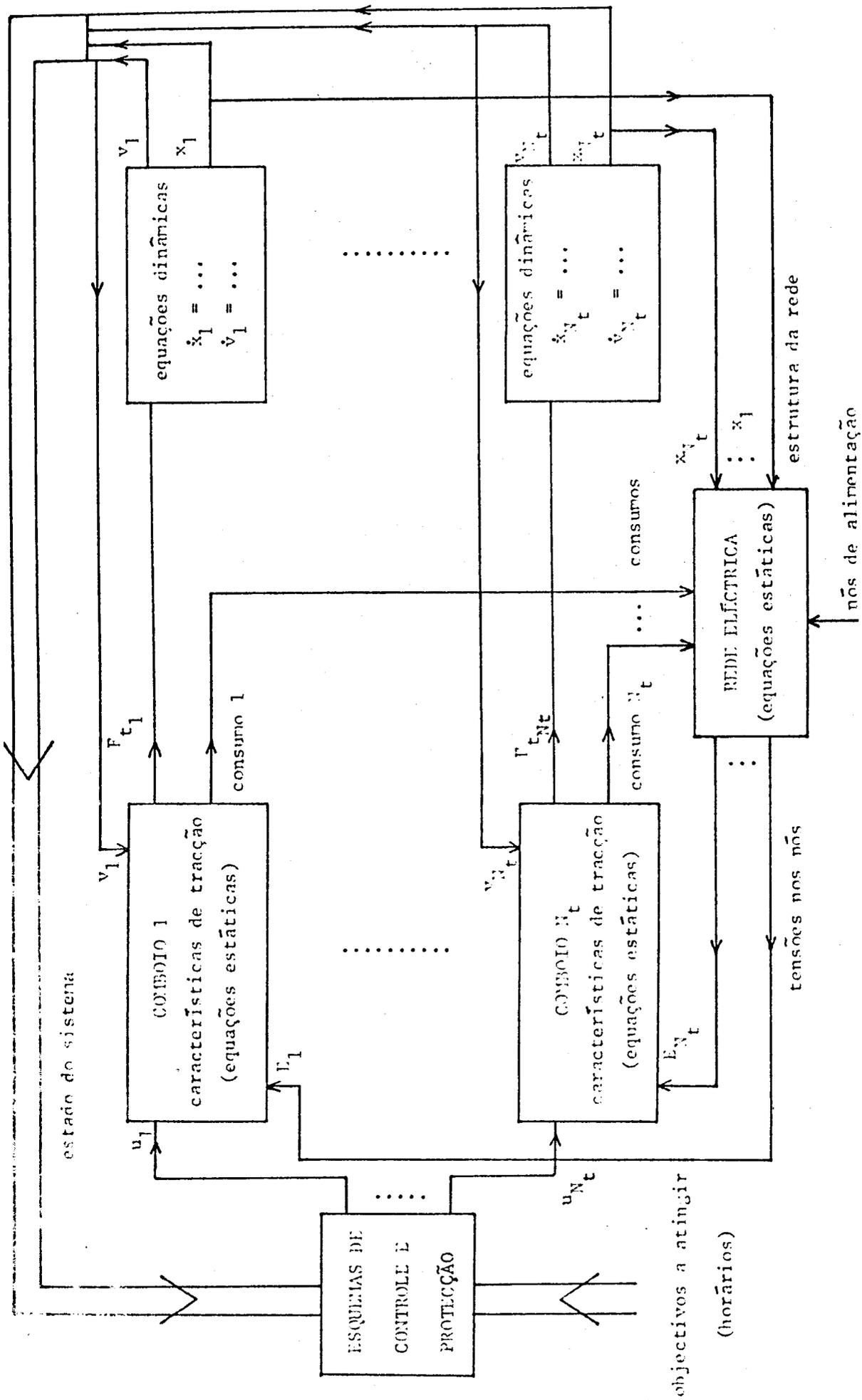
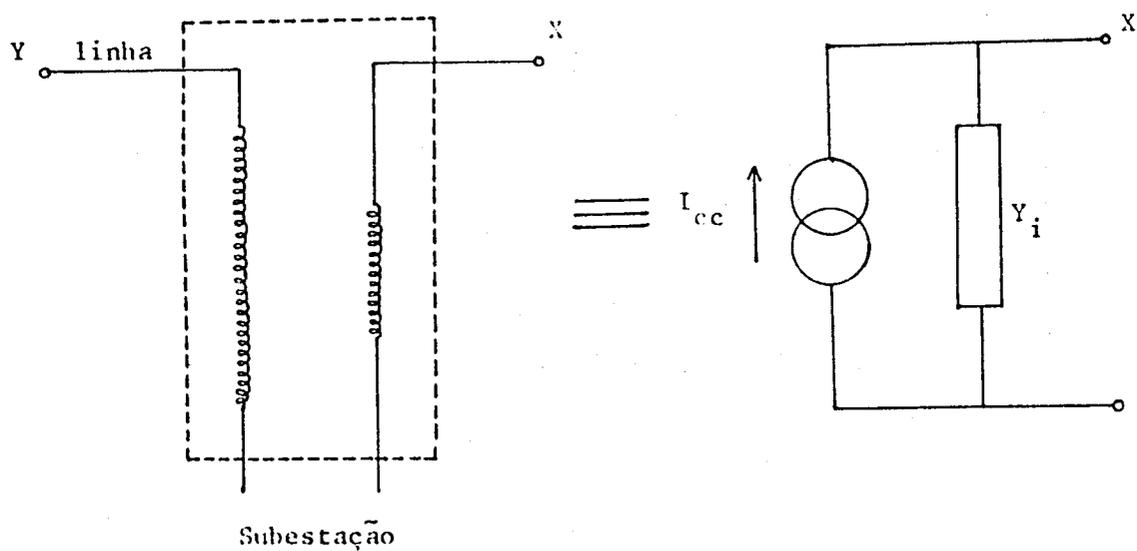


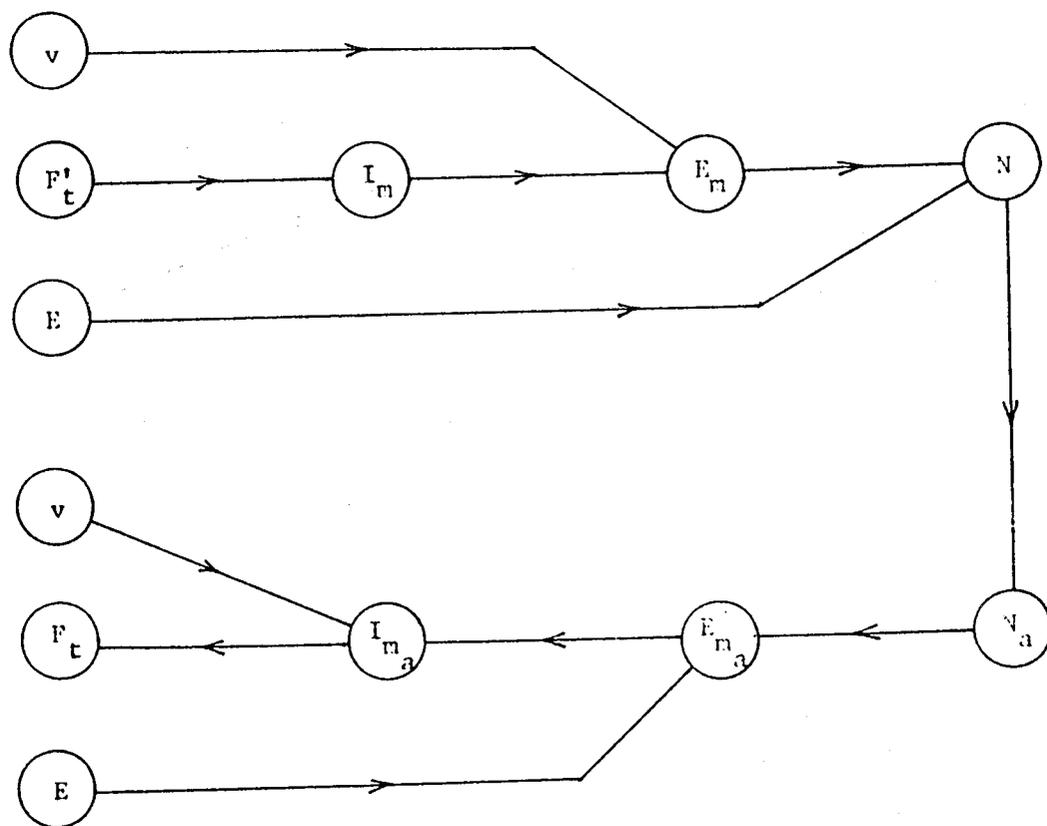
Fig. 3.2 Relações entre as várias equações descritivas do sistema.



Y: Ponto de ligação à rede de alta tensão

X: Ponto de ligação à catenária

Fig. 3.3 Esquema simplificado de uma subestação e bipolo equivalente.



$I_m$ : corrente nos motores

$E_m$ : tensão nos motores

$N$ : posição contínua (teórica) do graduador

$N_a$ : posição inteira (real) do graduador

$I_{m_a}$ ,  $E_{m_a}$ : valores de  $I_m$  e  $E_m$ , resultantes da substituição de  $N$  por  $N_a$

Fig. 3.4 Exemplo da sequência de cálculos relativos às características de tracção sendo a entrada a força de tracção pretendida  $F_t'$  e a saída a força de tracção real  $F_t$ .

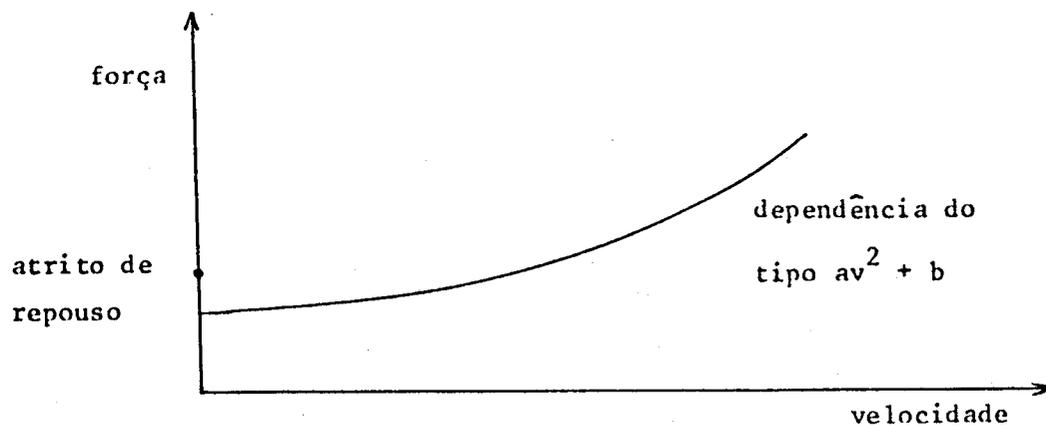


Fig. 3.5 Função utilizada para a dependência das forças de atrito e resistência ao ar com a velocidade.

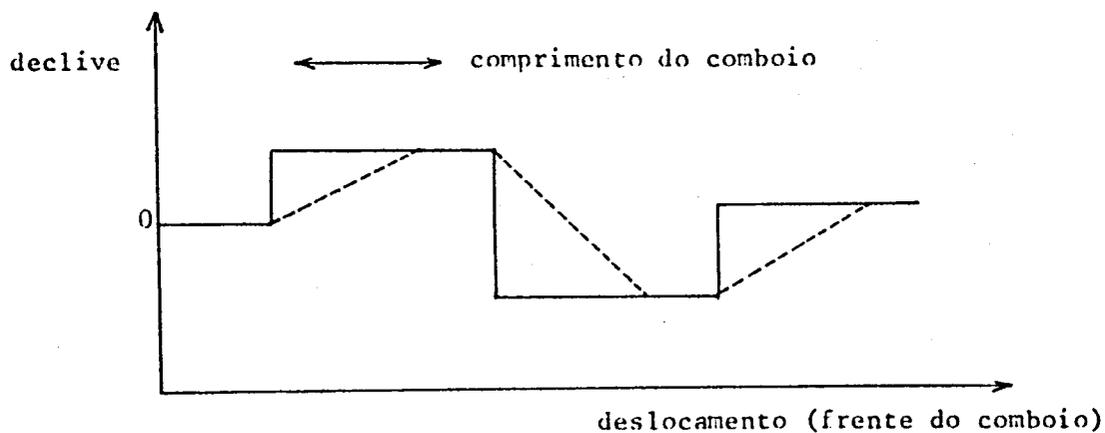


Fig. 3.6 Um dos efeitos da consideração de comprimentos não nulos para os comboios.

## CAPÍTULO 4

### RESOLUÇÃO DAS EQUACÕES DO SISTEMA

## 4. RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO SISTEMA

### 4.1 Introdução

No capítulo 3 formulamos as equações que relacionam em cada momento as variáveis do sistema (equações estáticas) e as que fornecem a derivada temporal do vector de estado (equações dinâmicas). O nosso objectivo no presente capítulo é descrever e justificar opções que tomamos relativamente ao método de resolução daquelas equações. Como é natural, somos levados a esquemas iterativos de resolução que deverão possuir um conjunto de características desejáveis, nomeadamente:

(1) fiabilidade na convergência sob toda a variedade de condições possíveis : tipos de locomotivas e redes eléctricas, condições de carga, tipo de controle, frequência da rede (50 Hz ou 16 2/3 Hz), etc.

(2) eficiência em termos de tempo de execução (e respeitando as restrições impostas em (1)) que se traduz em vários factores, sendo um dos mais importantes o número total de iterações efectuado.

(3) possibilidade de adaptação a todos os tipos plausíveis de modificações futuras.

Como veremos, a solução adoptada é relativamente simples e, nos exemplos testados, respondeu bem aos objectivos que acabamos de enunciar.

Neste capítulo começaremos por descrever em linhas gerais o método usado; em seguida estudamos algumas alternativas de resolução para as equações estáticas e indicaremos o método escolhido. Finalmente trataremos das

equações dinâmicas.

#### 4.2 Formulação do método em linhas gerais

O seguinte programa descreve de forma simplificada as operações efetuadas no que diz respeito à resolução das equações. Nele nada se refere relacionado com acontecimentos discretos.

```
T:=TINIT;
WHILE T <= TFIN DO
  BEGIN
    REGCNT;
    SOLVE;
    INCRM;
    T: = T + DT
  END
```

$T_{INIT}$  e  $T_{FIN}$  são respectivamente os momentos iniciais e finais de simulação.

$DT$  é o incremento de tempo em cada passo (variável dependente de vários factores relacionados com os acontecimentos discretos tratados no capítulo 6).

REGCNT é a rotina que, a partir da observação dos objectivos a atingir por cada comboio (sob a forma de horários), escolhe o valor das variáveis de controle a usar no momento actual (essas variáveis são no nosso caso forças de tracção pretendidas). Esta assunto é analisado no capítulo 7.

SOLVE é a rotina que resolve as equações estáticas que englobam as equações da rede eléctrica e as características de tracção das locomotivas. Como estas equações são não-lineares, SOLVE usará em geral métodos iterativos para a sua resolução.

INCRM calcula, a partir das forças de tracção actuais de cada comboio, a sua aceleração média durante DT e, a partir deste valor, determina o estado do sistema em  $T + DT$ . Trata-se basicamente da integração de um sistema de equações diferenciais ordinárias.

O método geral descrito abrange um grande número de situações possíveis, embora se possa pensar em esquemas de solução que não se enquadrem nele. Um exemplo é a consideração de métodos iterativos envolvendo simultaneamente as equações estáticas e dinâmicas.

O esforço computacional principal será concentrado em SOLVE pois neste "procedure" há que resolver iterativamente um conjunto de equações relativamente complexas e interdependentes.

#### 4.3 Solução das equações estáticas

Para uma melhor compreensão dos métodos adoptados vamos descrever resumidamente alguns esquemas alternativos para a resolução das equações estáticas.

Com vista a uma melhor esquematização dos métodos iterativos usados recorreremos àquilo a que chamamos diagramas de dependências. Estes diagramas são bastante intuitivos mas uma descrição um pouco mais pormenorizada pode

encontrar-se no apêndice A . O conteúdo deste parágrafo está directamente relacionado com o que se referiu no capítulo 3 sobre a formulação das equações do sistema (ver em particular a figura 3.2).

a) Métodos baseados na especificação dos consumos dos comboios através da amplitude da corrente e do seu esfasamento.

1) Uma vez conhecido o valor da grandeza de comando nos comboios, a sua velocidade e a tensão no pantógrafo é possível calcular a amplitude da corrente (no pantógrafo) e o seu esfasamento em relação à tensão.

2) A fase da corrente em cada comboio (no pantógrafo) pode ser estimada a partir do argumento da tensão actual:

$$\arg(I) \approx \arg(E) + \varphi$$

onde  $\varphi$  é o esfasamento da corrente absorvida relativamente à tensão.

3) As tensões (complexas) são recalculadas a partir da solução do sistema de equações:

$$YE = I$$

Os passos 2 e 3 serão repetidos até ser satisfeita uma certa condição de convergência.

Então o passo 1 será reiniciado e tudo se repete até que os valores de  $|I|$  e  $\varphi$  calculados não difiram dos anteriores mais que um certo valor de tolerância.

Este método está descrito na figura 4.1 onde se esquematiza o gráfico de dependências correspondentes. Note-se que somos levados a um duplo ciclo iterativo correspondente aos anéis 1 e 2 do gráfico. Este duplo ciclo corresponde, por outro lado, a uma dupla não linearidade: nas equações de

tracção e no problema da rede eléctrica onde, apesar das equações serem lineares, é introduzida uma não linearidade ao impôr condições de esfasamento entre tensões e correntes nos vários nós.

O duplo nível iterativo pode ser reduzido a um nível simples se apenas percorrermos o anel 1 iterativamente. Com efeito, neste caso, tal como se refere no apêndice A continua a verificar-se a condição necessária de convergência conquanto não seja estabelecida a condição  $\psi = \arg(I) - \arg(E)$  em cada iteração. O algoritmo descrito anteriormente que podemos esquematizar da seguinte forma

1 2 3 2 3 ... 2 3 1 2 3 2 3 ... 2 3 1 ...

ou mais resumidamente  $(1 (23)^*)^*$ ,

fica reduzido a

$(1 2 3)^*$

Na figura 4.2 estes dois algoritmos são esquematizados sob a forma de "procedures" (SOLVE 1 e SOLVE 2).

b) Métodos baseados na especificação dos consumos através das potências activas e reactivas dos comboios (caso b do capítulo 3).

Em vez de caracterizarmos os consumos dos comboios por  $|I|$  e  $\psi$ , podemos usar as potências  $P$  e  $Q$  ( $P = |E| \cdot |I| \cdot \cos \psi$ ,  $Q = -|E| \cdot |I| \cdot \sin \psi$ ) com vista à definição das cargas nos nós móveis.

Então usaremos para a resolução da rede eléctrica, um dos métodos clássicos para os problemas de fluxo de cargas (por exemplo o método de Newton-Raphson ou o método das admitâncias nodais).

Este método geral está esquematizado na figura 4.3 e, tal como no

caso anterior, poderemos optar entre a inclusão ou não de um ciclo iterativo interior com vista a assegurar em cada iteração externa uma solução aproximada da rede eléctrica.

Na figura 4.4 os dois "procedures" correspondentes (SOLVE 3 e SOLVE 4) são esquematizados. Embora estas figuras estejam orientadas para um método de resolução particular do fluxo de cargas (Newton-Raphson) é simples generalizar para os outros métodos.

c) Métodos baseados na especificação dos consumos através da admitância complexa (caso c do capítulo 3)

Conhecidos  $|I|$  e  $\varphi$ , a admitância para cada comboio (que em geral não é uma constante) pode ser facilmente calculada:

$$- Y_d = ( |I| / |E| ). (\cos \varphi + j \sin \varphi).$$

Estas admitâncias são incluídas na matriz das admitâncias da rede (diagonal principal), reduzindo-se as equações da rede eléctrica a um sistema linear. Portanto nesta formulação (sem dúvida a mais simples) aparece apenas, desde o início, um ciclo iterativo.

Na figura 4.5 descreve o esquema de dependências e na figura 4.6 podemos observar o "procedure" respectivo (SOLVE 5).

Comparação dos vários métodos de solução

Os vários algoritmos mencionados (SOLVE 1 a SOLVE 5) para a resolução das equações estáticas têm diferentes propriedades de convergência. Infelizmente a sua eficiência depende de vários factores que não estão fixados

mas que podem variar com cada aplicação do programa, nomeadamente:

- 1) as características da rede eléctrica (cuja topologia é variável)
- 2) as condições de carga da rede (normalmente a convergência é mais lenta, ou nem chega a verificar-se, para condições de carga pesadas tal como acontece por vezes nas redes de caminho de ferro)
- 3) as características das locomotivas: relações entre velocidades, forças de tracção, correntes, factores de potência, etc
- 4) a grandeza de controle ( $u$ ) especificada: posição de um graduador, força de tracção pretendida, etc.

A necessidade de aplicar o mesmo algoritmo (se possível) às várias condições referidas pode levar a um sacrifício na sua velocidade de convergência com vista a obter-se uma garantia de convergência nas várias situações que podem surgir. Felizmente o algoritmo escolhido (basicamente o SOLVE 5) parece satisfazer bem estes compromissos.

Embora seja difícil fazer observações genéricas quanto à velocidade de convergência podemos afirmar o seguinte:

- a) Os algoritmos baseados nas correntes e esfasamentos dos comboios (SOLVE 1 e SOLVE 2) seriam óptimos numa situação em que as características das locomotivas e a grandeza de controle  $u$  fossem tais que  $|I|$  e  $\varphi$  dependessem exclusivamente de  $v$  e  $u$  (e não de  $E$ ):

$$|I| = f(v, u)$$

$$\varphi = g(v, u)$$

Nesta situação, o ciclo 1 desaparece do diagrama da figura 4.1 e o

problema reduz-se à resolução (iterativa) da rede eléctrica. A condição referida poderá ser satisfeita em alguns casos de forma aproximada. Em particular, se a grandeza de comando for uma força de tracção (atendendo à grande correlação entre força de tracção e correntes nos motores) é de esperar que a corrente no pantógrafo dependa essencialmente da velocidade e da força de tracção. Estas observações genéricas estão condicionadas ao tipo particular de locomotiva utilizada.

b) Os algoritmos baseados na especificação das potências activas e reactivas seriam normalmente eficientes numa situação em que as características das locomotivas e o método de controle adoptado fossem tais que se verificasse que os valores de P e Q consumidos dependessem apenas da velocidade e da grandeza de comando

$$P = f(v, u)$$

$$Q = g(v, u)$$

Estas condições parecem não se observar (nem de forma aproximada) para os tipos usuais de controle.

Estes métodos poderão ter algum interesse pelo facto de aproveitarem os algoritmos bastante sofisticados e eficientes para resolução dos problemas de fluxo de cargas.

Infelizmente o mais eficiente destes algoritmos ('Fast Decoupled Load Flow') baseia-se em pressupostos que nem sempre são válidos nas redes de caminho de ferro, nomeadamente:

(1) reactância das linhas bastante superior à resistência; se pretendemos que o método usado seja adaptável não só às redes de frequência industrial (50 Hz) onde a hipótese é geralmente válida mas também a ou

tras situações (em particular à frequência bastante usada em redes de caminhos de ferro de 16 2/3 Hz) este método não poderá ser usado com eficiência.

(2) Desvios relativamente pequenos da situação nominal: nas redes de caminhos de ferro a tensão pode descer (em utilização normal) durante curtos intervalos de tempo até valores de 50% da tensão nominal. Como há interesse em simular estas situações deve ser escolhido um método de resolução capaz de oferecer boas garantias de convergência nestas circunstâncias.

De uma forma geral, somos da opinião que os algoritmos baseados na especificação das potências activas e reactivas aplicadas às redes eléctricas de caminhos de ferro são algo artificiais introduzindo complicações nas equações que não se justificam.

c) O método baseado na especificação da impedância complexa dos comboios foi escolhido neste trabalho; as razões principais desta escolha são as seguintes:

(1) método conceptualmente mais simples que os outros, pois envolve apenas um anel no diagrama de dependências

(2) a experiência computacional com este método revelou boas garantias de convergência mesmo em situações de linhas sobrecarregadas; a velocidade de convergência observada pode considerar-se pouco dependente do número de comboios no sistema

(3) a velocidade de convergência é bastante boa, mesmo quando se escolhe para grandeza de controle a força de tracção pretendida (nesta situação o algoritmo mais indicado seria baseado na especificação dos consumos pelas correntes e esfasamentos). O número de iterações para um erro (máxima diferença entre valores sucessivos das tensões) da ordem de 3V (em

25 000 V) é normalmente de 1 a 4 podendo atingir 6 ou 7 em casos excepcionais

(4) uma análise que foi efectuada para uma locomotiva de características conhecidas (AL6) revela uma relativa independência da sua admitância complexa relativamente à tensão do pantógrafo (apêndice B).

Como desvantagem deste método, citemos o facto da diagonal da matriz das admitâncias mudar de iteração para iteração, o que obriga a inverter a matriz em cada iteração. Este facto não tem todavia a gravidade que aparenta. Na realidade é usado um algoritmo para a resolução de sistemas de equações esparsas ( $YE = I$ ) que consta dos seguintes passos fundamentais ([28]):

(1) Leitura e codificação da estrutura da rede

(2) Simulação do passo (3), atendendo apenas à topologia da rede (elementos de  $Y$  não nulos, independentemente da sua grandeza) com vista a uma boa (dinâmica) ordenação dos nós

(3) Construção da matriz inversa na forma factorizada pelo algoritmo da bifactorização usando a ordem dos nós definida em (2)

(4) Cálculo de vector  $E$  a partir do segundo membro ( $I$ ) e  $Y^{-1}$  (na forma factorizada calculada em (3)).

Ora, como em cada iteração há apenas alteração de alguns elementos não nulos  $Y_{ii}$  da diagonal principal de  $Y$  (os correspondentes aos comboios) concluímos que a topologia da rede não varia e por isso os passos (1) e (2) podem ser colocados fora do ciclo iterativo. Nos outros métodos referidos (SOLVE 1 - SOLVE 4) também o valor de  $Y$  é invariante e por isso o pas

so (3) pode da mesma forma ser efectuado apenas uma vez antes do ciclo iterativo.

Para redes médias e grandes, o maior tempo de execução (com os algoritmos usados) é o do passo (2); este facto resulta de ele ser o único que não cresce linearmente com o número de elementos não nulos de  $Y$ .

Na figura 4.7 é representado o PROCEDURE SOLVE 5 de uma forma um pouco mais pormenorizada e reflectindo as considerações que acabamos de fazer.

O problema da construção da matriz das admitâncias  $Y$  a partir da posição actual dos comboios é tratado resumidamente no capítulo 6.

#### Um problema numérico

Em certas situações, observam-se algumas dificuldades de convergência cuja origem não está no método mas em questões numéricas. Essencialmente o problema deveu-se ao facto de a admitância interna no ponto de alimentação da rede eléctrica ser (em módulo) muito inferior à admitância entre dois nós próximos da rede. Por exemplo, num caso particular tínhamos os seguintes valores:

$$|Y_{int}| \approx 1,5 \cdot 10^{-2} \Omega^{-1} \quad (\text{nó de alimentação } 1)$$

$$|Y_{li}| \approx 1\,600 \Omega^{-1} \quad \text{entre dois nós } l \text{ e } i \text{ espaçados de } l \text{ m na catenária ("i" representando um comboio e "l" no nó de alimentação)}$$

a razão dos dois valores é da ordem de  $10^5$ .

Como os dois valores são termos de  $Y_{11}$ :

$$Y_{11} = Y_{int} - Y_{1i} \dots\dots,$$

pode deduzir-se a origem dos problemas encontrados, nomeadamente quando se usa um critério de convergência entre duas iterações sucessivas que se traduz numa variação máxima de, por exemplo 2 V em 25 000; nestas circunstâncias a soma dos elementos da 1.<sup>a</sup> linha de Y é muito pequena em face de  $Y_{11}$ ; o que torna a matriz quase singular.

A interpretação desta situação é a seguinte: neste caso as quedas de tensão principais ocorrem no transformador de alimentação, sendo praticamente iguais as tensões em nós próximos.

A solução pode consistir em fazer a fusão de nós próximos da rede ou, alternativamente, evitar  $Y_{ij}$  com módulo excessivo (o que é equivalente a forçar uma certa distância mínima entre dois nós). A segunda solução deu inteira satisfação (adoptando-se para distância mínima cerca de 10m).

#### 4.4 Solução das equações dinâmicas

Uma vez resolvidas (com um certo grau de aproximação) as equações estáticas no instante T iremos incrementar o tempo de DT e actualizar o estado do sistema.

Trata-se basicamente da resolução numérica de um sistema de equações diferenciais ordinárias de 1.<sup>a</sup> ordem e o método escolhido descrito na figura 4.8 é uma adaptação do método preditor-corrector.

Não nos parece justificável a adopção de um método mais sofisticado (um método de ordem superior) pelas seguintes razões:

(1) a função declive ( $\text{grad}(x)$ ) é geralmente aproximada por uma função descontínua e é sabido que nestes casos os métodos de integração mais simples (o método de Euler, por exemplo) dão melhores resultados pois não impõem grandes exigências analíticas às equações a integrar.

(11) o comando  $u(t)$  é constituído por uma "função em escada" descontínua (em geral) nos pontos da discretização temporal.

Se pretendêssemos diminuir os erros na fase de integração (sem referir a necessária coerência com os erros introduzidos na solução das equações estáticas) deveríamos começar por melhorar a representação das funções de declive e de comando. De uma forma geral, é difícil discutir *à priori* os efeitos das várias aproximações no erro final mas uma certa experiência poderá ser adquirida pela utilização do programa desenvolvido.

Convém aqui referir que o intervalo  $DT$  de integração das equações dinâmicas não é constante, podendo ser afectado por vários acontecimentos; porém, o seu valor encontra-se sempre entre dois limites pré-fixados fornecidos como dados.

#### Duas variantes do método de integração:

Referimos aqui duas alterações possíveis à classe de métodos que temos referido. Uma delas usa uma solução iterativa para o incremento do estado; a outra não usa qualquer método iterativo (apenas a integração usual das equações de estado).

##### A. Iteração no incremento de estado (é o método utilizado em [1])

A ideia base é a seguinte: antes de incrementar o estado não sabemos os valores finais das posições e velocidades os quais são necessários

(para calcular por exemplo a configuração da rede eléctrica, o declive e os atritos). Por isso usa-se um método iterativo (um ciclo externo ao ciclo das equações estáticas). Este processo está representado esquematicamente na figura 4.9, e corresponde a um método predictor-corrector de ordem superior.

Parece-nos que o uso deste método iterativo "externo" não se justifica em face das aproximações utilizadas, nomeadamente a representação pontual dos comboios e a representação em escada do comando  $u$ . Por outro lado se admitirmos o uso deste método porque não reduzir o duplo ciclo iterativo a um só? (isto é, em cada iteração das equações estáticas incrementar também o estado do sistema, usando o estado médio na iteração seguinte).

#### B. Integração das equações dinâmicas sem a resolução iterativa das equações estáticas

Em certas circunstâncias é possível, sem grande erro cometido, evitar a resolução iterativa das equações estáticas. O método é basicamente o seguinte:

(1) As equações de tracção são resolvidas de forma aproximada usando a velocidade (prevista em  $T + DT/2$ ), o vector das tensões já calculado no instante  $T$  e o comando  $u$ .

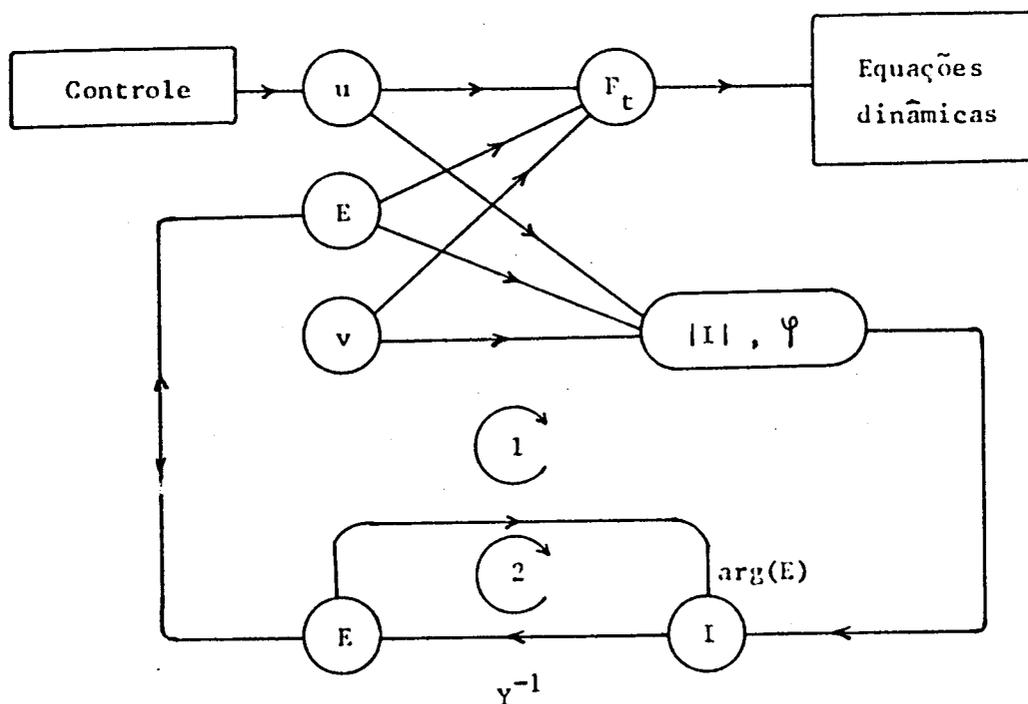
(2) As equações da rede eléctrica (determinada a partir das posições previstas no instante  $T + DT$ ) são resolvidas, fornecendo o vector  $E$  previsto no instante final

(3) As equações dinâmicas são integradas entre  $T$  e  $T + DT$  (usando as forças de tracção calculadas em (1)), fornecendo o novo estado ( $x(T+DT)$ ,  $v(T+DT)$ ) no instante  $T + DT$ .

(4) volta-se ao início até se atingir o tempo final de simulação.

A figura 4.10 ilustra o comportamento típico observado (e esperado) durante algumas experiências com este método. Em A,  $\Delta T$  é suficientemente pequeno para que os valores calculados acompanhem as variações temporais do comando e da estrutura do sistema. Em B, isso não acontece e o erro é acumulado.

Este método, embora mais eficiente que os anteriores, não foi escolhido por não oferecer suficientes garantias no que diz respeito à possível acumulação de erro.



$u$  : entrada de comando

$E, I$  : tensões e correntes (complexas)

$\Psi$  : esfasamento =  $\arg(I) - \arg(E)$

$v$  : velocidade

$F_t$  : forças de tracção

Fig. 4.1 Diagrama de dependências para a representação dos consumos por  $|I|$  e  $\Psi$ ; todas as grandezas representadas são vectores excepto  $Y$  que é uma matriz; por conveniência o nó  $E$  está duplicado.

```

PROCEDURE SOLVE 1;
BEGIN
  iniciar E;
  REPEAT
    calcular  $F_t$ ,  $|I|$  e  $\varphi$  a partir de U, V e E;
    REPEAT
       $\arg(I) := \arg(E) + \varphi$  ;
      calcular  $E = Y^{-1} I$ 
    UNTIL satisfeitas condições de convergência da rede eléctrica
  UNTIL satisfeitas condições gerais de convergência
END

```

```

PROCEDURE SOLVE 2;
BEGIN
  iniciar E;
  REPEAT
    calcular  $F_t$ ,  $|I|$  e  $\varphi$  a partir de U, V e E;
     $\arg(I) := \arg(E) + \varphi$  ;
    calcular  $E = Y^{-1} I$ 
  UNTIL satisfeitas condições gerais de convergência
END

```

Fig. 4.2 PROCEDURES baseados no gráfico da figura com ciclo de iteração duplo (SOLVE 1) e simples (SOLVE 2).

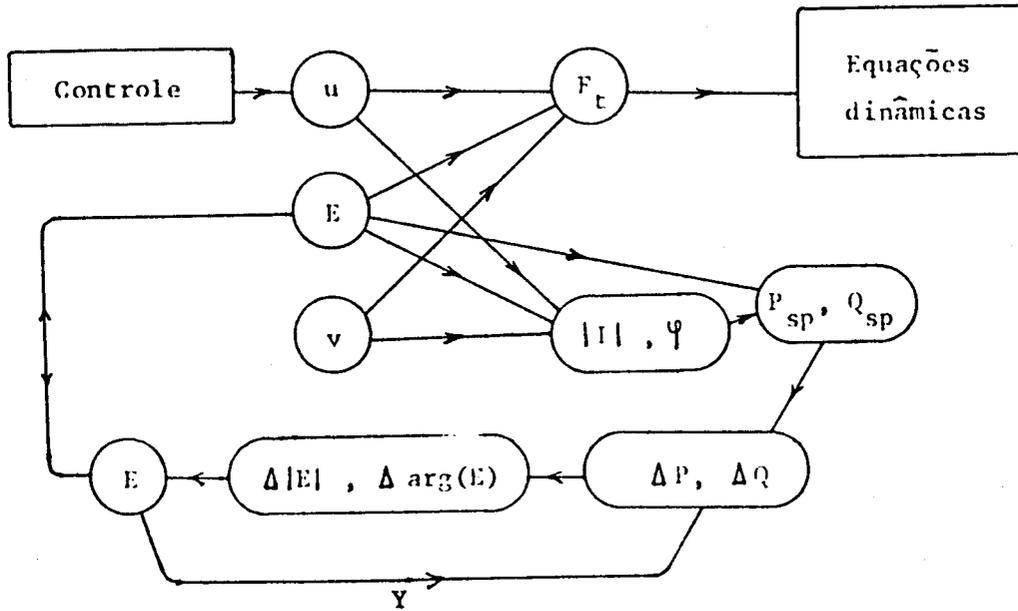


Fig. 4.3 Diagrama de dependências para a solução das equações estáticas usando um método do tipo do Newton-Raphson para a solução da rede elétrica.

```

PROCEDURE SOLVE 3 (e SOLVE 4);
BEGIN
  iniciar E;
  REPEAT
    calcular  $F_t$ ,  $|I|$  e  $\varphi$  a partir de  $U$ ,  $V$ ,  $E$ ;
     $P_{sp} := |E| \cdot |I| \cdot \cos \varphi$ ;  $Q_{sp} := -|E| \cdot |I| \cdot \sin \varphi$ ;
    (especificar o(s) barramento(s) alimentador(es) em termos de  $P_{sp}$ ,  $Q_{sp}$ )
    [REPEAT]
    usando  $E$  (actual) e  $Y$  calcular  $P$ ,  $Q$  e  $\Delta P = P_{sp} - P$ ,  $\Delta Q = Q_{sp} - Q$ ;
    calcular  $\Delta|E|$ ,  $\Delta(\arg(E))$  usando  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  e actualizar  $E$ 
    [UNTIL] satisfeitas condições de convergência da rede eléctrica;
  UNTIL satisfeitas as condições de convergência gerais
END

```

Fig. 4.4 PROCEDURE SOLVE 3, usando o diagrama da fig. 4.3 com duplo ciclo de iterações. Retirando "REPEAT" e "UNTIL" dentro dos parêntesis rectos obtemos o "procedure" com um só ciclo de iterações a que chamamos SOLVE 4.

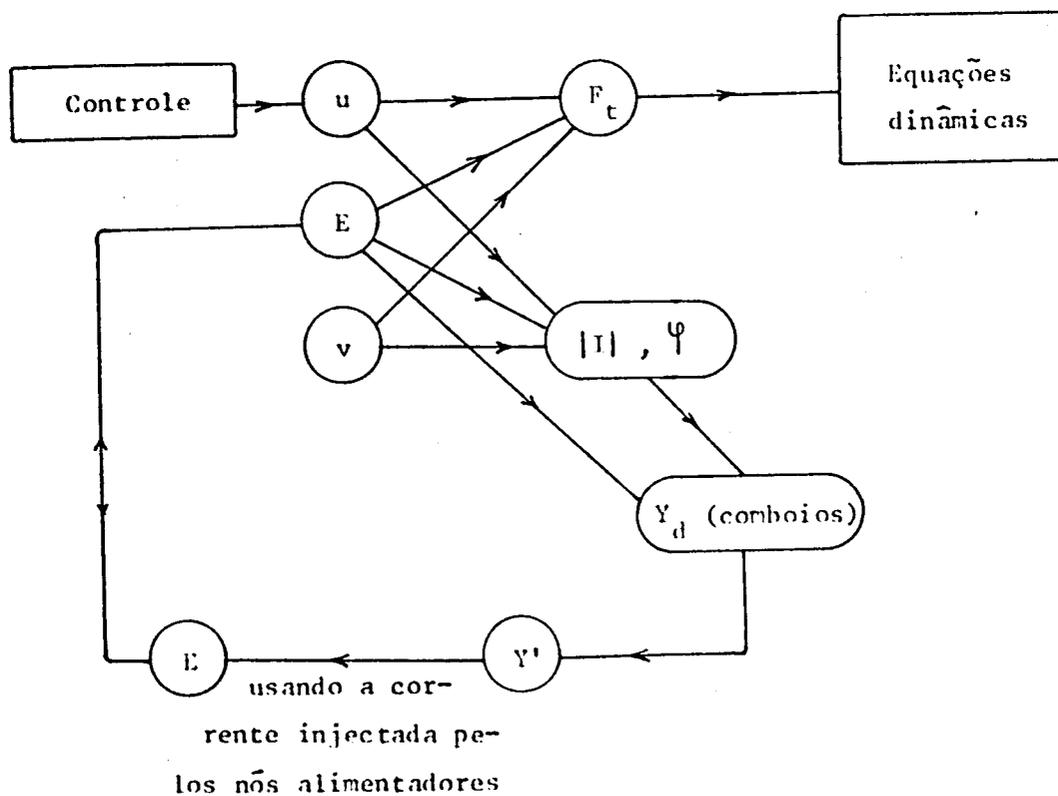


Fig. 4.5 Esquema das dependências para a solução das equações estáticas, representando os comboios por impedâncias complexas;  $Y'$  é a matriz das admitâncias com a inclusão da admitância própria dos comboios ( $Y_d$ ).

```
PROCEDURE SOLVE 5;  
BEGIN  
  inicia E;  
  REPEAT  
    calcula  $F_c$ ,  $|I|$ ,  $\varphi$  a partir de U, E, V;  
    calcula  $Y_d = |I| / |E| \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi)$ ;  
    calcula  $Y'$ , somando  $Y_d$  à diagonal principal de Y;  
    calcula  $E = Y'^{-1} I'$  onde  $I'$  é não nulo apenas para o(s) nó(s) alimen-  
    tador(es)  
  UNTIL satisfeitas condições gerais de convergência  
END
```

Fig. 4.6 PROCEDURE correspondente à fig. 4.5, usando um ciclo simples iterativo.

PROCEDURE SOLVE 5;

BEGIN

para cada comboio:

a partir da velocidade actual e do comando  $u$

(força de tracção pretendida no nosso caso)

prever o valor da velocidade a meio do incremento temporal

$(v(T + DT/2))$ ;

a partir das posições dos comboios previstas a meio do incremento de tempo  $(x + v(T + DT/2) \cdot DT/2)$  determinar a topologia da rede e os valores dos elementos de  $Y$  fora da diagonal principal bem como os elementos desta diagonal já conhecidos (barramentos fixos da rede eléctrica); efectuar os passos (1) e (2) do algoritmo referido para a solução do sistema de equações esparsas;

REPEAT

para cada comboio TR:

a partir do valor de comando  $u_{TR}$ , da tensão actual  $E_{TR}$  e da velocidade  $v_{TR}$  calcular a sua admitância complexa e incorporá-la na matriz  $Y$ ;

efectuar os passos (3) e (4) do algoritmo referido (bifactorização e solução para o vector  $I$  conhecido);

calcular o erro máximo nas tensões:

$(|\Delta E|_{\text{real}} + |\Delta E|_{\text{imag}})_{\text{máx}}$

UNTIL erro máximo  $\leq$  tolerância fixada

END

Fig. 4.7 Algoritmo usado para a solução iterativa das equações estáticas.

PROCEDURE INCRM;

BEGIN

Nota: antes da aplicação deste PROCEDURE as equações estáticas já foram resolvidas usando a rede eléctrica média prevista (em  $T + DT/2$ );

Para cada comboio activo TR:

determinar a aceleração:

$$Ac_{TR} = F_{c_{TR}} / M_{TR} - grad(x_{TR}) - F_{r_{TR}}(v_{TR})$$

(os valores das resistências e atritos e do declive utilizados são valores previstos a meio do intervalo de integração sendo utilizados as velocidades e a aceleração anteriores para esta previsão)

determinar a velocidade final e incrementar o estado:

$$v_{TR} = v_{TR} + Ac_{TR} \cdot DT$$

$$x_{TR} = x_{TR} + (v_{TR} + v_{anterior}) \cdot DT/2$$

END

Fig. 4.8 A passagem do estado em T para o estado em  $T + DT$ .

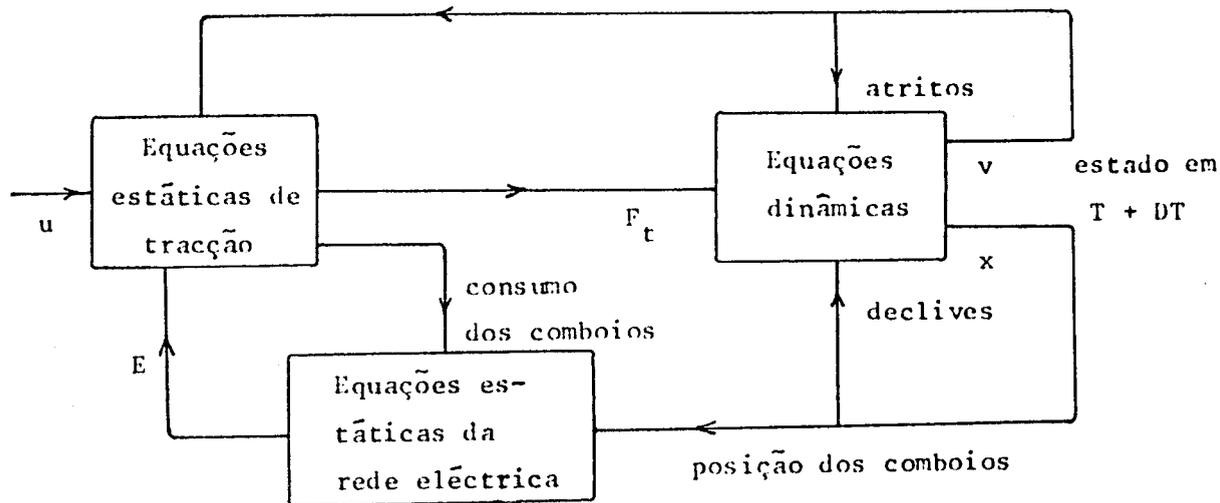


Fig. 4.9 Representação do esquema de solução iterativa das equações estáticas e dinâmicas

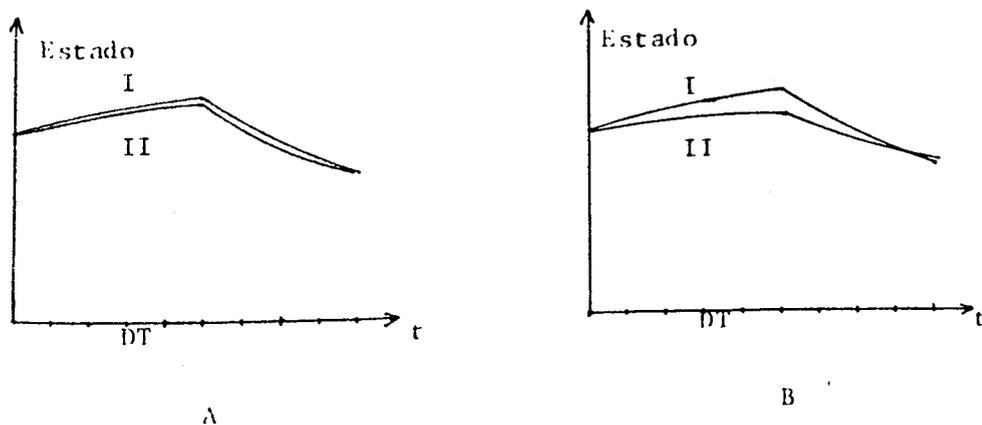


Fig. 4.10 Influência de  $DT$  na acumulação de erros para um método sem solução iterativa instantânea das equações.

I - curva exacta      II - curva aproximada

CAPÍTULO 5

REPRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE TRACÇÃO

## 5. REPRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE TRACÇÃO

### 5.1 Introdução

É difícil integrar num esquema comum as particularidades das características de tracção dos vários tipos de locomotivas. Entre as locomotivas alimentadas por corrente alternada podemos distinguir, entre outros, os seguintes tipos:

- motores alimentados por corrente alternada monofásica
- motores trifásicos alimentados por grupos conversores monofásico-trifásico
- motores de corrente contínua obtida por rectificação (com rectificadores de silício, por exemplo) da tensão monofásica
- motores de corrente contínua alimentados por rectificadores incorporando tiristores os quais permitem uma regulação contínua da tensão.

Para a simulação em vista, basta a utilização das características externas de tracção que são normalmente fornecidas (embora por vezes de forma algo incompleta) pelos fabricantes. Por isso não é o nosso objectivo caracterizar internamente os fenómenos nas locomotivas, mas usar directamente as curvas características.

O programa de simulação efectuado pode incorporar 9 tipos diferentes de locomotivas, dos quais os 6 primeiros correspondem a locomotivas eléctricas, (TRCT1 a TRCT6) e os outros (TRCT7 a TRCT9) não eléctricos.

Cada utilizador deverá incorporar no programa as subrotinas respecti

vas traduzindo as características das locomotivas que utiliza. Assim, este capítulo é basicamente exemplificativo dos métodos a usar.

## 5.2 Objectivos das subrotinas de tracção

Cada subrotina de tracção traduz as características principais de um certo tipo de locomotiva. Como se refere no capítulo 7, há sempre uma certa indefinição na fronteira entre o controle e as características de tracção; por isso encontraremos relações entre os métodos de controle escolhidos e as representações para as características de tracção.

Os principais objectivos a conseguir pelas rotinas de tracção são:

1 - Estabelecer restrições às forças de tracção pretendidas por forma a que estas só tomem valores realizáveis.

2 - Para uma certa força de tracção especificada e, conhecida a velocidade actual e a tensão no pantógrafo, determinar

a) a força de tracção efectivamente conseguida

b) a impedância complexa apresentada pela locomotiva (no pantógrafo).

3 - Fornecer outras características importantes tais como a resistência ao movimento da locomotiva (como função da velocidade) ou a capacidade de travagem.

Foram modeladas as características de três tipos de locomotivas

— AL6 da "British Railways" a partir de características fornecidas

- automotoras U.T.E. com quatro motores directos OSA 750
- automotora U.T.E. - Si

É este último tipo que será usado como exemplo no presente capítulo correspondentes à subrotina TRCT1 já incorporada no programa desenvolvido.

### 5.3 Esquema geral de tracção para as automotoras U.T.E. - Si

Na fig. 5.1 estão representadas de uma forma simplificada os principais componentes eléctricos de tracção nas automotoras U.T.E. - Si; cada automotora utiliza quatro motores alimentados por corrente contínua resultante da rectificação da tensão monofásica obtida à saída do transformador.

A regulação da força de tracção exercida pela automotora fez-se de duas formas (fig. 5.1):

- pontos 1 ... 28: variação do ponto de tomada do secundário do transformador causando uma correspondente variação da tensão de alimentação dos motores em circuito aberto (desde 20 V para o ponto 1 até 1070 V para o ponto 28)

- pontos 29 e 30: a tensão em circuito aberto aplicada aos motores mantêm-se em 1070 V mas a excitação do circuito indutor é reduzida de 90% para 55% e 40% respectivamente.

Devido às limitações existentes, o ponto 29 só deve ser usado para velocidades superiores a 60 km/h e o ponto 30 para velocidades superiores a 70 km/h.

Na figura 1 do apêndice C estão representadas estas características.

#### 5.4 Restrições às grandezas de controle

Uma primeira função das rotinas de tracção é limitar a força de tracção "pretendida" pelos algoritmos de controle a um valor que satisfaça às diversas restrições impostas pelas características. Esse valor admissível é usado na fase da previsão dos valores na solução das equações do sistema num certo instante. O valor exacto será normalmente diferente do valor previsto embora em geral seja bastante próximo.

Observação: Neste capítulo usaremos as unidades de km/h e tonelada-força em vez de respectivamente m/s e N, o que permite um relacionamento mais directo com as curvas características.

As principais restrições podem classificar-se em

##### a) Restrições estáticas

Na fig. 5.2 podemos observar as curvas marcadas de (I) a (VI) que limitam a zona admissível de funcionamento nas características força de tracção - velocidade:

(I) e (II) Limitações da velocidade: a velocidade deve estar compreendida entre zero e um valor máximo; para a automotora U.T.E. - Si usa-

mos

$$0 \leq v \leq 120$$

(km/h).

(III) Limitação da máxima força de tracção: devido à intensidade das correntes nos motores e a restrições mecânicas a força de tracção não pode ultrapassar um certo valor; para este tipo de automotoras esse limite é de cerca de 11 toneladas; a restrição correspondente será:

$$F_t \leq 11 \text{ toneladas}$$

(IV) Limitação da máxima força de travagem (pode depender da velocidade)

Utilizamos  $F_t \geq -14$  toneladas

Foi usado o valor constante de 14 toneladas por falta de dados relativos à variação do limite com a velocidade;

Note-se que as restrições III e IV podem ser influenciadas pelas condições particulares de aderência aos carris.

(V) Limitação de potência. A potência máxima útil de tracção não pode exceder para este tipo de locomotivas o valor de 1660 kW donde resulta a seguinte limitação hiperbólica:

$$P_t = F_t \cdot v \leq 609 \text{ ton.km/h} \approx 1660 \text{ kW.}$$

(VI) Limitações dos comandos de controle. As posições admissíveis dos comandos de controle podem limitar o valor máximo da força de tracção para uma certa velocidade (além disso, como veremos, podem exercer uma discretização nesses valores). Esta limitação depende em geral da tensão no pantógrafo.

No nosso caso a curva  $F_{t30}(v)$ , que dá a força de tracção obtida à velocidade  $v$  e na posição 30 do graduador, exerce uma limitação deste tipo.

## b) Restrições dinâmicas

### (I) Limitação na velocidade de actuação nos comandos.

Por razões mecânicas e humanas não é possível mudar instantaneamente a posição do graduador. Este fenómeno foi modelado de forma aproximada introduzindo duas constantes  $DF_a$  e  $DF_b$  que representam a variação máxima da força de tracção por unidade de tempo, respectivamente na aceleração e na travagem. A introdução desta limitação causa uma certa "filtragem" nas grandezas de controle, evitando mudanças demasiado bruscas e frequentes do seu valor.

### (II) Limitação devida a problemas de aquecimento.

Os problemas de aquecimento podem surgir basicamente em duas circunstâncias: aquecimento das componentes eléctricas devido a correntes absorvidas elevadas e aquecimento dos órgãos de travagem. Estes dois fenómenos podem ser simulados por integração das equações diferenciais respectivas nas, devido à falta de dados, não foram incluídos. De qualquer forma, as curvas (V) e (IV) das limitações estáticas tomam em consideração de uma forma rudimentar os problemas de aquecimento.

## 5.5 Características de tracção

De acordo com a grandeza de controle usada neste algoritmo (a força de tracção pretendida) o objectivo desta parte da rotina de tracção pode ser resumido assim:

"Dada a velocidade actual do comboio (na realidade trata-se de velocidade prevista a meio do intervalo de integração) e a força de tracção pre

tendida (dentro da zona admissível) calcular a admitância complexa do comboio (vista do pantógrafo) e a força de tracção real". Esta operação é efectuada em cada iteração da solução das equações estáticas do sistema.

Um método de cálculo possível (correspondente a um graduador de pontos) está traduzido na fig. 3.3 (capítulo 3) e usa como variáveis intermédias a corrente e a tensão nos motores.

Devido à forma específica das características de tracção decidimos (depois de algumas tentativas em outras direcções) modelar as características de tracção das automotoras U.T.E. - Si dividindo a zona permitida em duas zonas:

— uma zona contínua limitada pela curva  $F_{t23}(V)$  (ver fig. 1 do apêndice C) onde admitimos que as curvas características estão suficientemente próximas para que se possa considerar que há continuidade nos valores possíveis

— uma zona discreta limitada pelas curvas  $F_{t28}(V)$  e  $F_{t30}(V)$  onde (para uma certa velocidade) só são possíveis três valores da força de tracção (nomeadamente  $F_{t28}(V)$ ,  $F_{t29}(V)$  e  $F_{t30}(V)$ ).

É evidente que há um certo erro ao considerar uma zona contínua mas há também uma simplificação nos cálculos. Se se verificar que o erro não é suficientemente pequeno (o que acontece sobretudo às baixas velocidades) não será difícil discretizar toda a zona permitida.

#### Modelo para a "zona contínua"

Nesta zona admite-se que a força de tracção exacta é igual à preten-

dida (suposta dentro da zona contínua); na figura 5.3 representam-se os cálculos usados para a determinação da admitância complexa do comboio.

a) Curva  $E_m(F_t, v)$

Para uma certa força de tracção  $F_t$  é possível verificar que a relação entre a velocidade  $v$  e a tensão  $E_m$  nos motores (em vazio) é praticamente linear:

$$v = \alpha(F_t) \cdot E_m - \beta(F_t) \quad \text{ou} \quad E_m = \frac{v + \beta(F_t)}{\alpha(F_t)}$$

(As representações das funções  $\alpha(F_t)$  e  $\beta(F_t)$  são dadas no apêndice C. A função  $\beta(F_t)$  varia relativamente pouco com  $F_t$ ).

Isto não corresponde a afirmar que o espaçamento na horizontal (figura 1 - apêndice C) das várias curvas é proporcional a  $v$  (devido à relação não linear entre o ponto do graduador e  $E_m$ ).

A interpretação deste facto é a seguinte: ao fixarmos  $F_t$  estamos a fixar a corrente que atravessa o motor que determina as quedas de tensão no transformador, no circuito indutor e no próprio motor. Deste modo a f.c.e.m. do motor (proporcional a  $v$ ) difere da tensão em vazio aplicada de uma constante.

b) Cálculo de  $I_m$ ,  $n$  e  $I$

A corrente nos motores está directamente relacionada com a força de tracção:

$$I_m = I_m(F_t)$$

Esta relação é praticamente linear.

A razão de transformação  $n = E/E_m$  permite calcular a corrente  $I$  no

pantógrafo.

$$I = \frac{4 I_m}{n} + I_a = \frac{4 I_m E_m}{E} + I_a$$

em que  $I_a$  representa a corrente gasta em alimentações auxiliares que é fundamentalmente resistiva.

Não incluímos no modelo as perdas e quedas de tensão no transformador por falta de dados numéricos (é todavia simples modelar o transformador com maior precisão).

c) Cálculo da admitância complexa

$$Y_{re} = \frac{I}{E} \cos \psi \quad Y_{im} = \frac{I}{E} \sin \psi$$

#### Modelo para a "zona discreta"

Na ausência de dados numéricos sobre a dependência das curvas  $F_{t29}(v)$  e  $F_{t30}(v)$  com a tensão do pantógrafo  $E$  admitimos que o efeito é análogo ao de entrar nessas fórmulas com uma velocidade corrigida  $v_c$  que depende linearmente da relação  $E_s/E$  (onde  $E$  é a tensão no pantógrafo e  $E_s$  a tensão nominal da rede). Este método é análogo ao utilizado por Chang ([1]).

$$v_c = (v + \beta(F_t)) \cdot \frac{E_s}{E} - \beta(F_t)$$

Esta relação corresponde à dependência obtida para o modelo anterior (zona contínua).

Em  $\beta(F_t)$  usamos como argumento a força de tração prevista a que não introduz erros apreciáveis.

Dividimos a zona discreta em três partes:

Seja  $F_{28} = F_{t28}(v_c)$ ,  $F_{29} = F_{t29}(v_c)$ ,  $F_{30} = F_{t30}(v_c)$

$$\text{a) se } F_{28} \leq F_t < \frac{F_{28} + F_{29}}{2}$$

colocamos o graduador no ponto 28 e admitimos a força de tracção  $F_{28}$ .

$$\text{b) se } \frac{F_{28} + F_{29}}{2} \leq F_t < \frac{F_{29} + F_{30}}{2}$$

colocamos o graduador no ponto 29 e admitimos a força de tracção  $F_{29}$ .

$$\text{c) se } \frac{F_{29} + F_{30}}{2} \leq F_t \leq F_{30}$$

colocamos o graduador no ponto 30 e admitimos a força de tracção  $F_{30}$ .

Os cálculos da admitância  $Y$  dos comboios prosseguem agora segundo o diagrama da figura 5.4.

As funções  $F_{t28}(v_c)$ ,  $F_{t29}(v_c)$ ,  $F_{t30}(v_c)$  bem como as correntes de motor correspondentes aos pontos 29 e 30 ( $I_{n29}(F_t)$ ,  $I_{n30}(F_t)$ ) são dadas no apêndice C ; para o ponto 28 a relação é a indicada para a zona contínua ( $I_{n1}(F_t)$ ).

#### Observações

O modelo usado para a automotora U.T.E. - Si tem diversas imprecisões, das quais as mais importantes são as seguintes:

(1) - não consideração das perdas no transformador e na unidade rectificadora

(2) - utilização de um método aproximado para exprimir a dependência das características em relação à tensão no pantógrafo.

Este método corresponde basicamente a ignorar a influência das variações da tensão do pantógrafo no campo indutor dos motores (o que é razoável dado que ao fixar  $F_t$  e  $I_m$  estamos a fixar a corrente no indutor por se tratar de um motor série)

(3) - utilização de um valor constante para o factor de potência. A curva da figura 2 (apêndice C) representa a evolução do factor de potência durante uma "viagem" de um comboio deste tipo sendo possível observar que não há desvios muito grandes de 0,8. Este comportamento (numa automotora) é bastante distinto do das locomotivas funcionando segundo o mesmo princípio onde o factor de potência varia bastante com a velocidade (e em menor grau com a posição do graduador)

(4) - modelamento incompleto das limitações dinâmicas

(5) - modelamento contínuo de uma parte das características.

As quatro primeiras imprecisões devem-se exclusivamente à falta de dados numéricos concretos nas características fornecidas. Com um conjunto de curvas mais completas será possível fazer um tratamento mais exacto das características, usando um método exclusivamente do tipo "entrada-saída"; contudo isso não é presentemente possível para as automotoras U.T.E. - Si.

### 5.6 Modos de andamento

Para simular o controle normalmente usado nos comboios foi criada uma certa "banda" em torno de  $F_t = 0$ , definindo-se vários modos de andamen-

to ( $F'_t$  é a força de tracção pretendida):

- (1) travagem se  $F'_t < -\xi$
- (2) andamento livre -  $\xi \leq F'_t < \delta$ , toma-se  $F_t = 0$
- (3) aceleração "contínua"  $\delta \leq F'_t < F_{t28}(v)$  toma-se  $F_t = F'_t$
- (4) ponto 28 (zona (a) definida atrás)
- (5) ponto 29 (zona (b) definida atrás)
- (6) ponto 30 (zona (c) definida atrás).

Nas figuras 5.5 e 5.6 podemos observar o efeito da introdução da "banda"  $[-\xi, \delta]$  e a relação entre as forças de tracção pretendidas e obtidas para duas velocidades distintas  $V_0$  e  $V'_0$ . No segundo caso é atingida a limitação da tracção máxima ainda durante o modo (3) pelo que os modos (4) (5) e (6) estão fora da zona permitida.

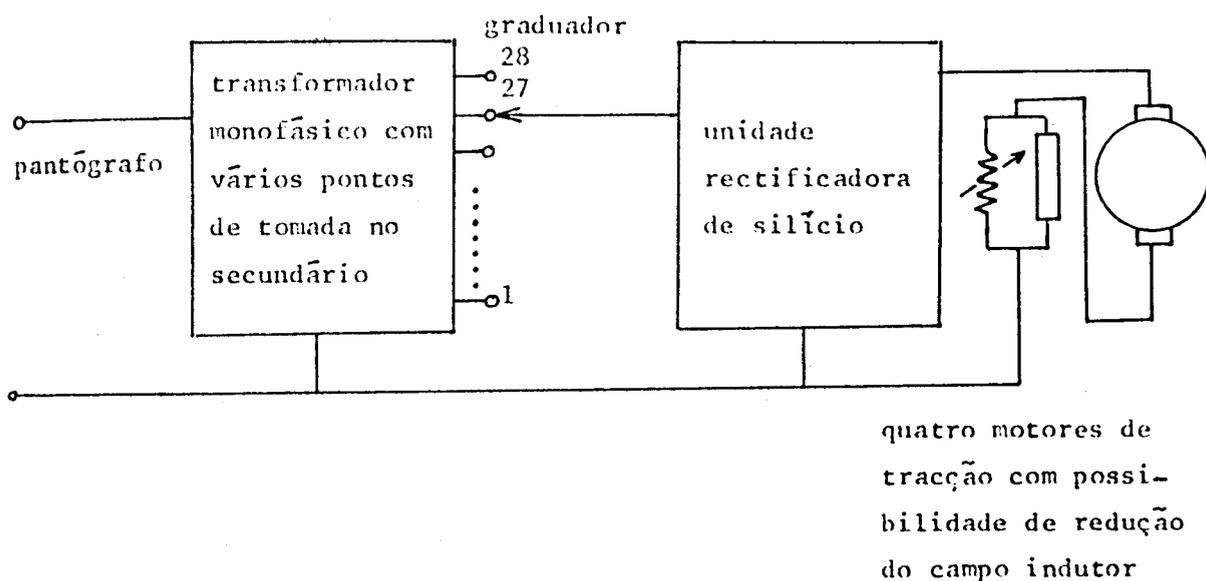


Fig. 5.1 Componentes elétricos principais utilizados na tração das locomotivas U.T.E. - Si.

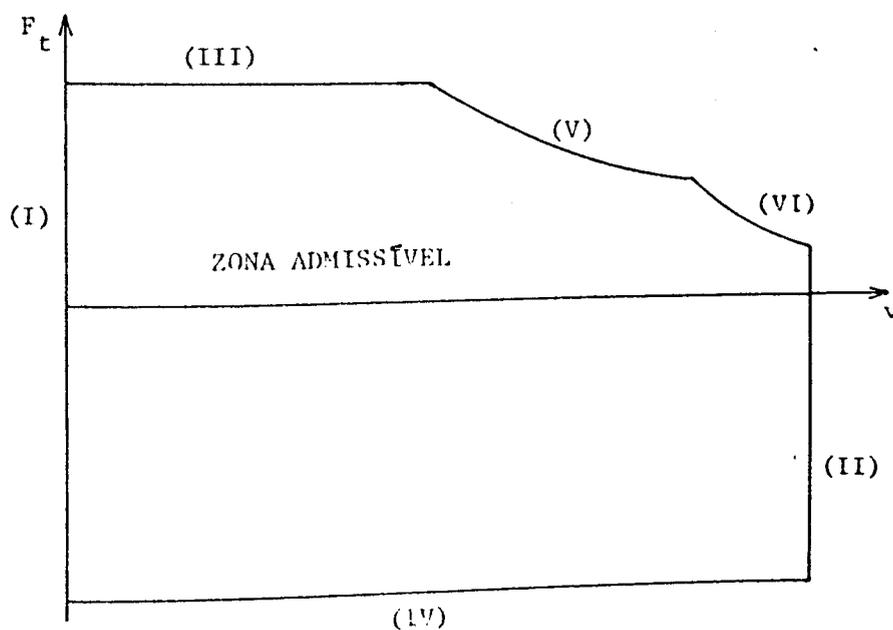


Fig. 5.2 Limitações das grandezas  $F_t$  e  $v$ .

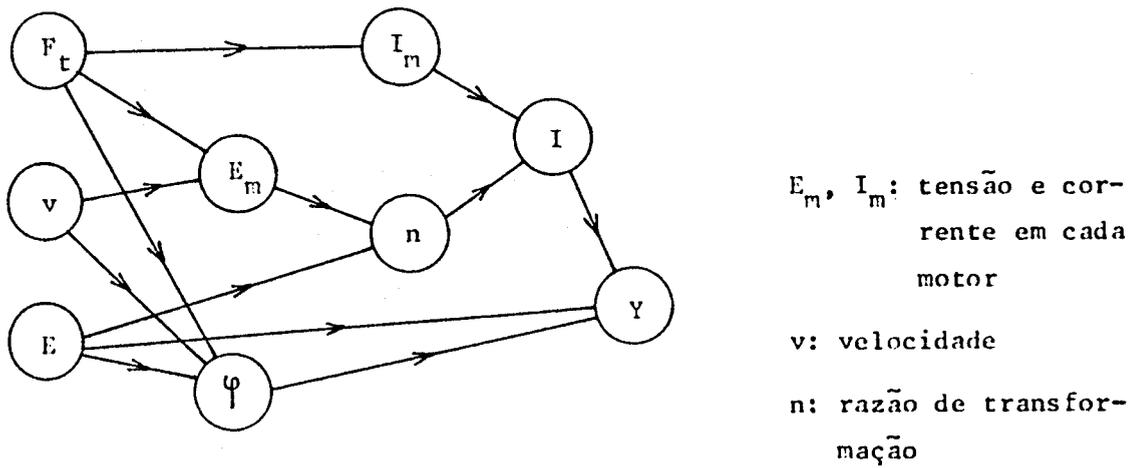


Fig. 5.3 Diagrama de dependências para o cálculo de  $Y$  (impedância interna do comboio) na zona contínua.

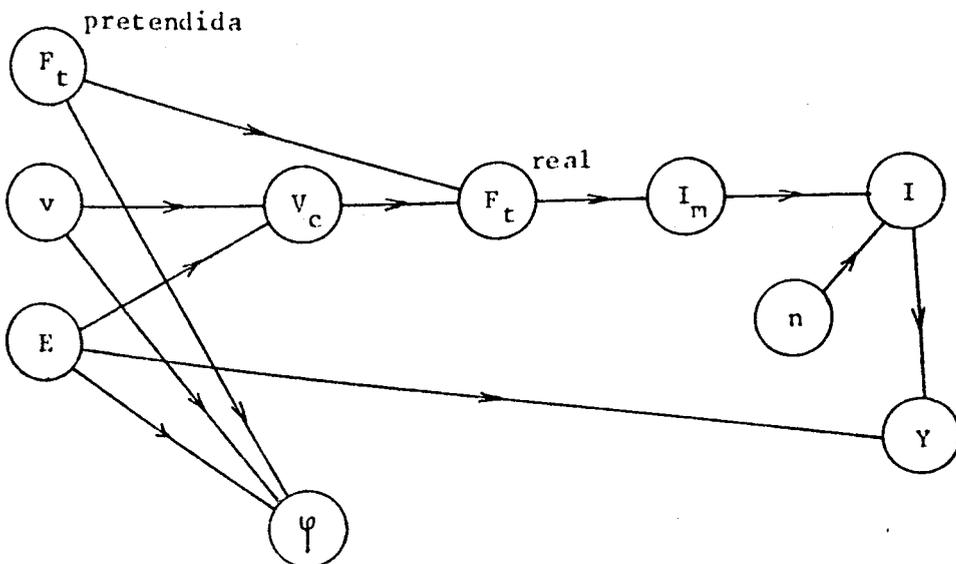


Fig. 5.4 Diagrama de dependências usado para a zona discreta; as variáveis estão definidas na fig. 5.3.

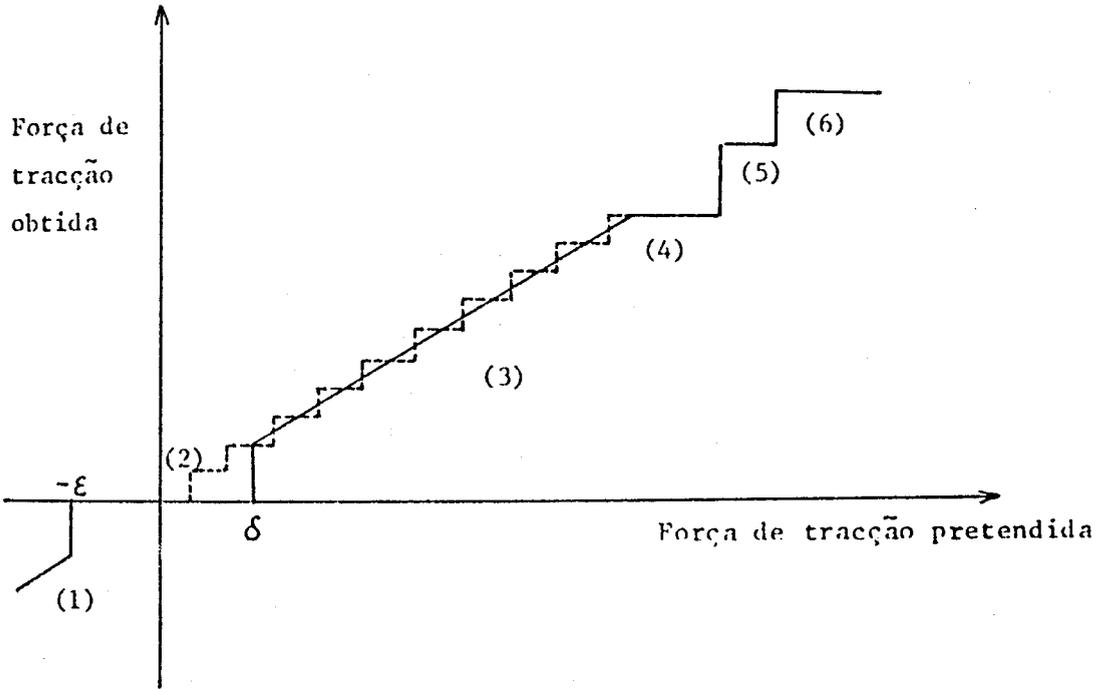


Fig. 5.5 Modos de tracção para uma velocidade  $v_0$ : a tracejado estão indicados os valores obtidos na realidade com o conjunto de pontos do graduador.

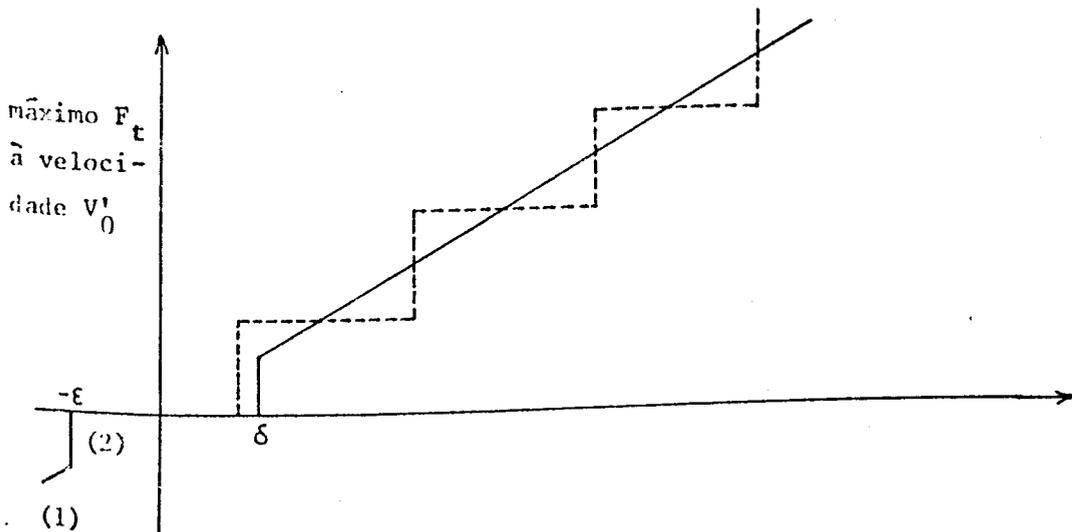


Fig. 5.6 Modos de tracção para uma velocidade  $v'_0 < v_0$ .

CAPÍTULO 6

ACONTECIMIENTOS E ESTADOS DISCRETOS

## 6. ACONTECIMENTOS E ESTADOS DISCRETOS

### 6.1 Introdução

Todo o sistema, constituído pelos comboios, pela rede ferroviária e pela rede eléctrica pode evoluir (ao nível de detalhe em que esta simulação é efectuada) de dois modos distintos - uma evolução contínua em que a estrutura e os parâmetros do sistema não se modificam (só mudam as variáveis de entrada e de estado) e uma evolução discreta que se traduz por uma mudança mais ou menos brusca da estrutura ou dos parâmetros em certos instantes bem definidos.

É claro que esta distinção não é fisicamente absoluta, mas depende essencialmente do modelo matemático utilizado.

Observe-se que dos três sub-sistemas em iteração apenas a rede ferroviária tem uma estrutura essencialmente fixa.

Neste capítulo discutiremos os tipos de acontecimentos discretos no sistema, a sua relação com a discretização temporal e a implementação no programa do conceito de acontecimento.

### 6.2 Os comboios - estados e acontecimentos

Cada comboio pode ser modelado como um processo ([3]) que evolui através do sistema podendo ter vários estados discretos e podendo mudar de estado pelo efeito de acontecimentos.

Ao nível discreto distinguimos os seguintes estados para cada comboio:

— estado activo (comboio em movimento) podendo decompor-se em vários modos - aceleração, travagem, etc.

— estado parado - o comboio encontra-se parado num certo ramo da rede ferroviária (numa estação ou não), interferindo normalmente com os outros comboios no mesmo ramo

— estado passivo - o comboio encontra-se parado, fora da rede ferroviária, não interferindo com os outros comboios (por exemplo, parado numa estação). Um comboio neste estado pode ser activado e voltar a entrar na rede

— estado final - o comboio abandonou a rede ferroviária, não podendo ser reactivado (no programa de simulação o espaço de memória e número interno respectivo poderá ser ocupado por outro comboio).

O diagrama 6.1 ilustra, de uma forma um pouco simplificada as relações entre os estados dos comboios (círculos) e os acontecimentos (arcos).

### 6.3 Duas classes de acontecimentos

Nesta altura é conveniente discutir uma relação importante entre os acontecimentos discretos e a evolução contínua que se traduz na influência dos acontecimentos nos instantes de discretização das equações dinâmicas.

Sendo as equações dinâmicas equações diferenciais cuja solução é obtida partindo de uma discretização temporal, somos levados a resolver equações discretas que nos permitem obter o estado no instante  $T + DT$  a partir

do instante  $T$ . O intervalo  $DT$  da discretização não deve ser fixado à priori a partir de considerações de precisão numérica porque, num sistema como o que estamos a discutir, há factores que levam a usar um  $DT$  variável, em particular:

— podemos estar interessados em obter o estado do sistema no instante  $T_1$  em que um certo comboio pára; se  $T_1 - T < DT$ , esse instante não é observado: neste caso usamos  $DT' = T_1 - T$  (em que  $T_1$  é o instante previsto de paragem) para intervalo de discretização

— a estrutura do sistema (o número de comboios por exemplo) pode variar durante  $DT$  o que pode introduzir problemas na integração das equações

Estas observações levam-nos a distinguir duas classes de acontecimentos com base no facto de determinarem ou não um instante de discretização; definimos:

— acontecimentos do tipo H como sendo os que forçam um instante de discretização no momento da sua ocorrência

— acontecimentos do tipo S como sendo aqueles cuja ocorrência pode ser ignorada durante o intervalo de discretização, sendo "executados" no instante final  $T + DT$ .

A figura 6.2 ilustra esta diferença.

A distinção entre os dois tipos é subjectiva, dependendo por exemplo da grandeza dos erros aceitáveis e da conveniência de estruturação do programa.

#### 6.4 Principais acontecimentos e seus efeitos

Caracterizam-se em seguida os principais acontecimentos e os seus efeitos.

##### Acontecimentos de protecção

P1 - O comboio passa por um ponto de protecção devendo nesse momento executar o correspondente programa de protecção.

P2 - O comboio excede um limite de velocidade máxima, devendo então reduzir-se a grandeza da variável de comando com vista a que a velocidade regresse rapidamente a um valor permitido.

P3 - A distância de um comboio ao que vai à sua frente no mesmo ramo torna-se inferior a um certo valor mínimo de segurança. O comboio deve travar.

##### Acontecimentos relativos aos horários

A1 - Um comboio entra no sistema.

A2 - Um comboio para por ordem do horário, ficando na rede.

A3 - Um comboio para e é passivado, isto é, considera-se que abandona a rede.

A4 - Um comboio parado arranca por ordem do horário.

A5 - Um comboio passivado executa um programa de protecção para o arranque, iniciando ou não o seu movimento conforme o resultado desse programa.

A6 - Um comboio abandona definitivamente a rede ferroviária.

A7 - Um comboio passivado muda de ramo (simulando por exemplo mudança de linha, inversão do sentido).

A8 - Um comboio parado ou passivado muda de massa (o carregamento ou descarregamento numa estação pode causar mudanças muito significativas da massa total da composição).

A9 - Um comboio passa por um ponto de horário (pontos nos quais há uma variação de objectivo a cumprir pelo comboio).

#### Outros acontecimentos

X1 - Mudanças de topologia da rede eléctrica (variação do número de comboios activos, passagem de um comboio no seu carinho por um barramento eléctrico da rede).

X2 - Mudanças de ramo de um comboio no seu carinho normal.

X3 - Mudança do declive (como o declive é geralmente modelado com variações bruscas pode interessar a detecção destas variações considerando-as acontecimentos).

#### Acontecimentos do programa

Incluimos na lista dos acontecimentos os seguintes factos relacionados com o programa de simulação:

S1 - Início do programa, com colocação de valores iniciais em várias estruturas de informação.

S2 - Instantes nominais de discretização temporal - o instante da discretização é fixado como sendo o mínimo entre o momento do próximo acontecimento do tipo H e o instante nominal seguinte de discretização temporal. Desta forma, o intervalo de discretização nunca excede um certo valor nominal.

S3 - Instantes de impressão dos resultados - para certos momentos fixados *à priori* (e que são independentes dos acontecimentos mencionados em S2) há uma saída de resultados descrevendo o estado do sistema (posições e velocidades dos comboios, tensões nos vários barramentos, etc.)

### 6.5 Execução dos acontecimentos

No programa que foi realizado consideramos como acontecimentos do tipo H (que forçam um instante da discretização) os acontecimentos A1 a A8 e S1 a S3.

Cada instante de discretização é fixado por um (e em geral um só) destes acontecimentos; desta forma, sempre que as equações são resolvidas para o intervalo  $DT$  e após o incremento no estado do sistema, é "executado" o acontecimento que originou esse instante de discretização.

Não é difícil imaginar como se processa esta execução para cada tipo de acontecimento (exemplos: impressão de resultados para S3, a paragem e saída do comboio do ramo respectivo para o acontecimento A3). Por isso, nos disparamos de descrever em mais pormenores essas execuções (ver subrotina EXEVT do programa).

Os outros acontecimentos são do tipo S, isto é a sua execução só é feita um pouco depois do instante em que ocorrem. Em cada instante de discretização faz-se uma pesquisa de todos os acontecimentos do tipo S que ocorreram durante o intervalo de discretização. (ver subrotina EXESFT do programa).

Como exemplo, consideremos dois acontecimentos do tipo S:

P2 - A velocidade excedeu a velocidade máxima num certo ponto. Se se verifica que durante um intervalo de discretização a velocidade de um comboio excede um certo limite, então para o próximo intervalo de discretização, o comboio não fica sujeito ao método de regulação definido pelo horário (isto obtém-se no programa atribuindo "TRUE" a variável booleana CNTRED(TR), o que significa "este comboio já está controlado") mas sofre uma redução da grandeza de comando (dentro dos limites impostos pela capacidade de desaceleração e velocidade de actuação).

Note-se que a função "velocidade limite em X" toma já em conta a presença de outros limites de velocidade à frente de X os quais podem obrigar (atendendo à capacidade limitada de desaceleração) a uma redução da velocidade limite tabelada em X (ver figura 6.3).

Por outro lado os métodos de regulação tomam já em conta a presença de velocidades limites (como as acabamos de descrever), tentando evitar excedê-las no instante final de discretização; apesar disto P2 ocorre algumas vezes.

#### X1 - Modificações na topologia da rede eléctrica

Durante um intervalo  $\Delta T$  de discretização a topologia da rede pode modificar-se; um exemplo é a passagem de um comboio por um barramento

transversal da catenária. Neste caso há duas opções básicas a distinguir:

— um método a que podemos chamar de "variacional" em que se guarda uma informação da topologia da rede (número de nós, par de nós a que liga cada linha) a qual se mantém fixa até que um acontecimento "X1" cause uma variação. Quando se detecta este acontecimento é executado um conjunto de instruções que causam a correspondente variação da estrutura

— um método a que podemos chamar "constructivo" em que a topologia da rede eléctrica é determinada em cada instante de discretização (na realidade é a rede prevista para a posição dos comboios no instante  $T + DT/2$  relativa ao intervalo da discretização que é calculada) pela construção da rede eléctrica através da posição de cada comboio e do ramo em que se encontra.

Neste caso optamos pelo segundo método pois parece não haver grande vantagem no facto de se memorizar a topologia da rede, quando se é obrigado a construir em cada instante de discretização a matriz das admittâncias que varia constantemente. Este segundo método é mais simples e sistemático (e mais fiável portanto) e a noção de acontecimentos do tipo X1 deixa de ter interesse (a filosofia das duas opções referidas aparece com certa generalidade - por exemplo para a determinação de uma função do deslocamento  $x$  de um comboio - e muitas vezes a primeira alternativa é mais eficiente).

Apresenta-se a seguir uma descrição sumária do algoritmo da construção da rede eléctrica. (ver subrotina ELENET do programa)

Cada ramo tem normalmente dois nós eléctricos nas extremidades, podendo ter outros no interior (ver figura 6.4). Cada nó eléctrico fixo tem

um número atribuído também fixo. Cada comboio tem um número "elétrico" (o índice do seu nó) que é determinado em cada construção da estrutura representativa da rede elétrica. Na figura 6.5 descreve-se simplificada o algoritmo para cálculo da matriz das admitâncias.

Para a rede representada na figura 6.4 as primeiras linhas construídas são

(do ramo 1)      ① - 7

7 - ②

② - ③

(do ramo 2)      ③ - 8

8 - 9

9 - ②

② - ①

...

Os comboios encontrados vão tomando números de nós (elétricos) consecutivos a partir de NFIX + 1.

## 6.6 Listas de acontecimentos do tipo H

No processo de simulação deve manter-se actualizada uma lista de acontecimentos do tipo H previstos em cada momento, por forma a definir sempre o próximo instante de discretização temporal como o correspondente ao

acontecimento de menor tempo de ocorrência memorizado nessa lista.

Por exemplo, se essa lista contém (no instante 10.2s) os seguintes acontecimentos

- 15s — tempo de impressão de resultados
- 12s — tempo nominal de discretização
- 18s — o comboio T1 arranca
- 11.2s — o comboio T2 pára numa estação

então deve ser seleccionado o último acontecimento, por ser o de menor tempo de ocorrência (11.2s).

Para alguns acontecimentos o seu tempo de ocorrência pode ser determinado *a priori* com exactidão (por exemplo o instante de impressão de resultados); para outros (por exemplo a paragem de um comboio numa estação) esse instante só pode ser previsto com alguma exactidão pouco antes da ocorrência. Por conveniência designamos os primeiros por acontecimentos do tipo H1 e os segundos por acontecimentos do tipo H2.

Podemos agora indicar as três operações fundamentais que podem actuar na lista de acontecimentos.

(1) Introdução de um acontecimento do tipo H1 na lista (pode ocorrer em diversas partes do programa).

(2) Introdução de um acontecimento do tipo H2 na lista se o seu tempo de ocorrência é inferior ao de qualquer outro acontecimento na lista. Se já existe um acontecimento H2 na lista ele é substituído pelo novo. Esta operação é efectuada, em cada instante de discretização, para todos os candidatos do tipo H2 a acontecimentos que fixam o instante seguinte de discretização.

(3) Selecção do elemento da lista com menor tempo de ocorrência e sua extracção da lista (fixação do próximo instante de discretização, subrotina NEXTEV no programa).

No apêndice E descrevemos o modo como foi implementada esta lista no programa.

### 6.7 Inclusão de acontecimentos discretos no programa de simulação

Na figura 6.6 representa-se sucintamente a inclusão de acontecimentos discretos no algoritmo básico representativo do programa de simulação.

Relativamente a este algoritmo convém fazer as seguintes observações:

1 - A resolução das equações estáticas e dinâmicas do sistema só é efectuada se a variação de tempo não for inferior a um certo valor mínimo, com vista a evitar cálculos em excesso e problemas numéricos (contudo os cálculos efectuam-se também se o acontecimento actual for impressão de resultados).

Todavia, o acontecimento actual é sempre executado; desta forma pode haver vários acontecimentos simultâneos do tipo II.

2 - A execução do acontecimento actual (subrotina EXEVT) pode dar origem à introdução na lista de novos acontecimentos do tipo II. Dois exemplos:

— a entrada de um comboio origina a leitura do tempo de entrada do comboio seguinte e este acontecimento (ou melhor o seu tempo de ocorrência) é introduzido na lista

— a impressão de resultados causa a introdução na lista de um novo acontecimento do mesmo tipo.

Este facto está representado na figura 6.7.

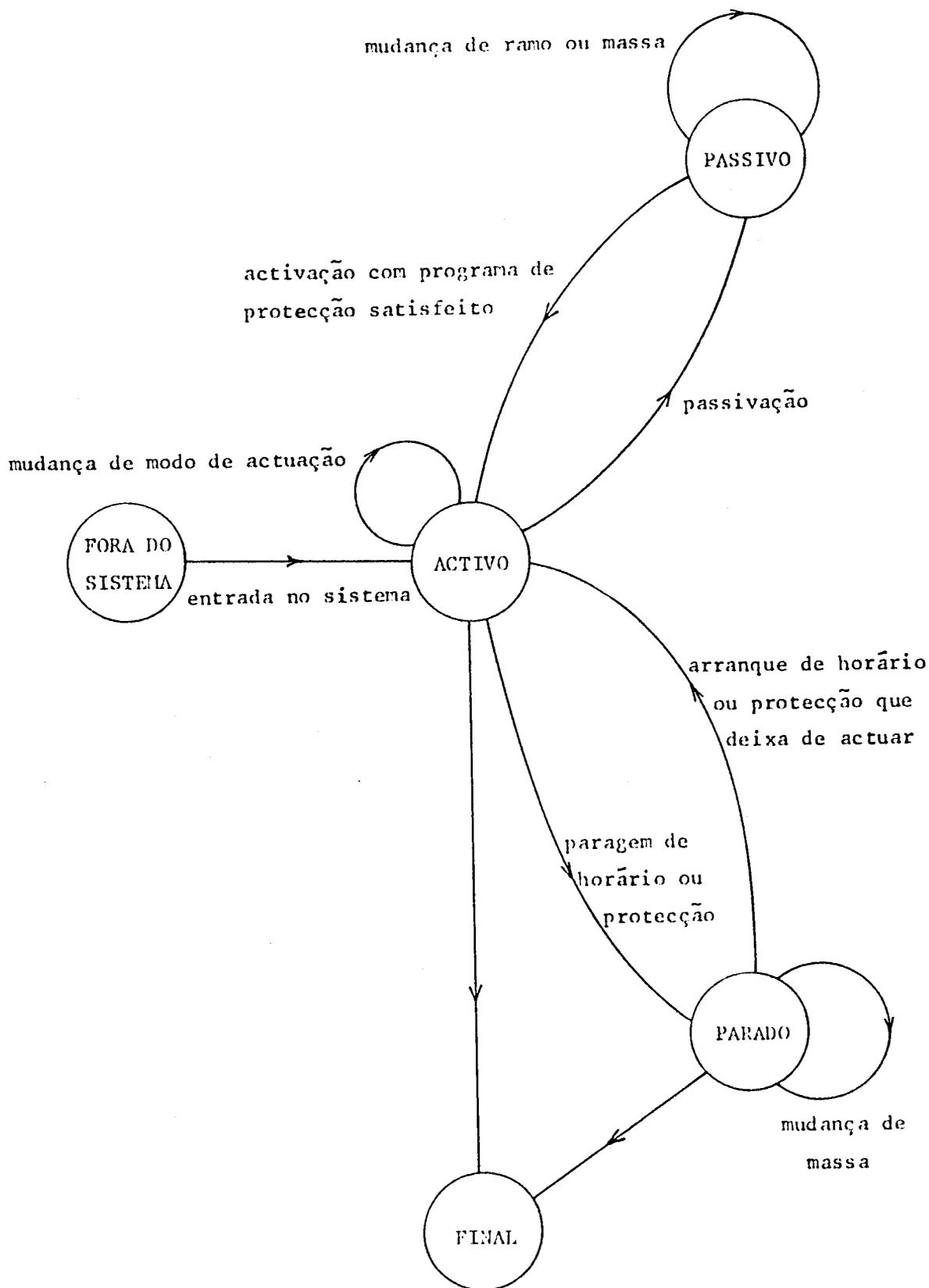


Fig. 6.1 Transições no estado discreto dos comboios.

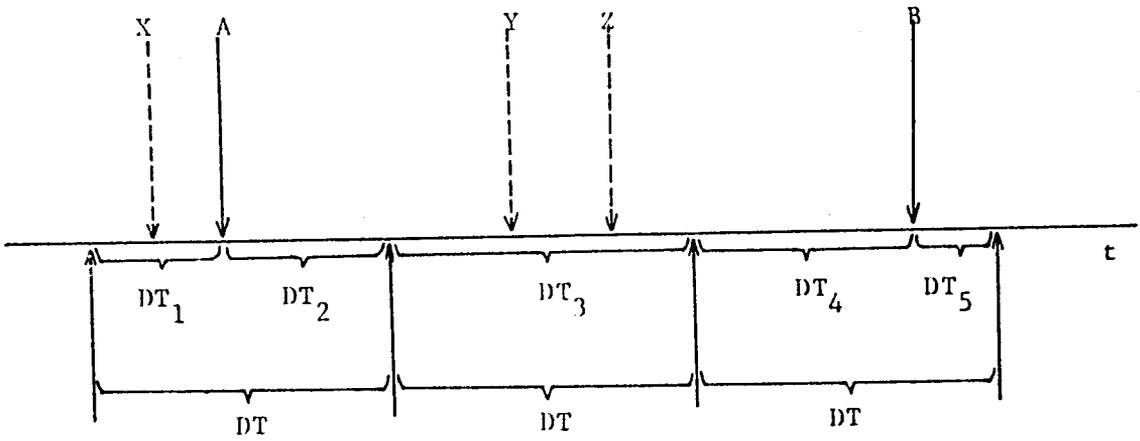


Fig. 6.2 Distinção entre os acontecimentos dos tipos II e S; A e B: acontecimentos do tipo II; X, Y e Z: acontecimentos do tipo S;  $DT_1$ ,  $DT_2$ ,  $DT_3$ ,  $DT_4$  e  $DT_5$ : intervalos de discretização;  $DT$ : intervalo nominal de discretização.

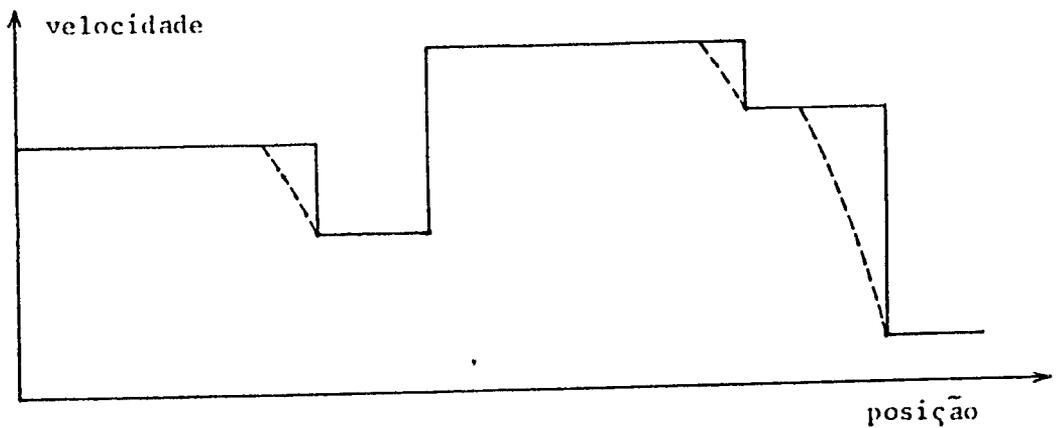


Fig. 6.3 Velocidades limites tabeladas (a cheio) e efectivas (a tracejado).

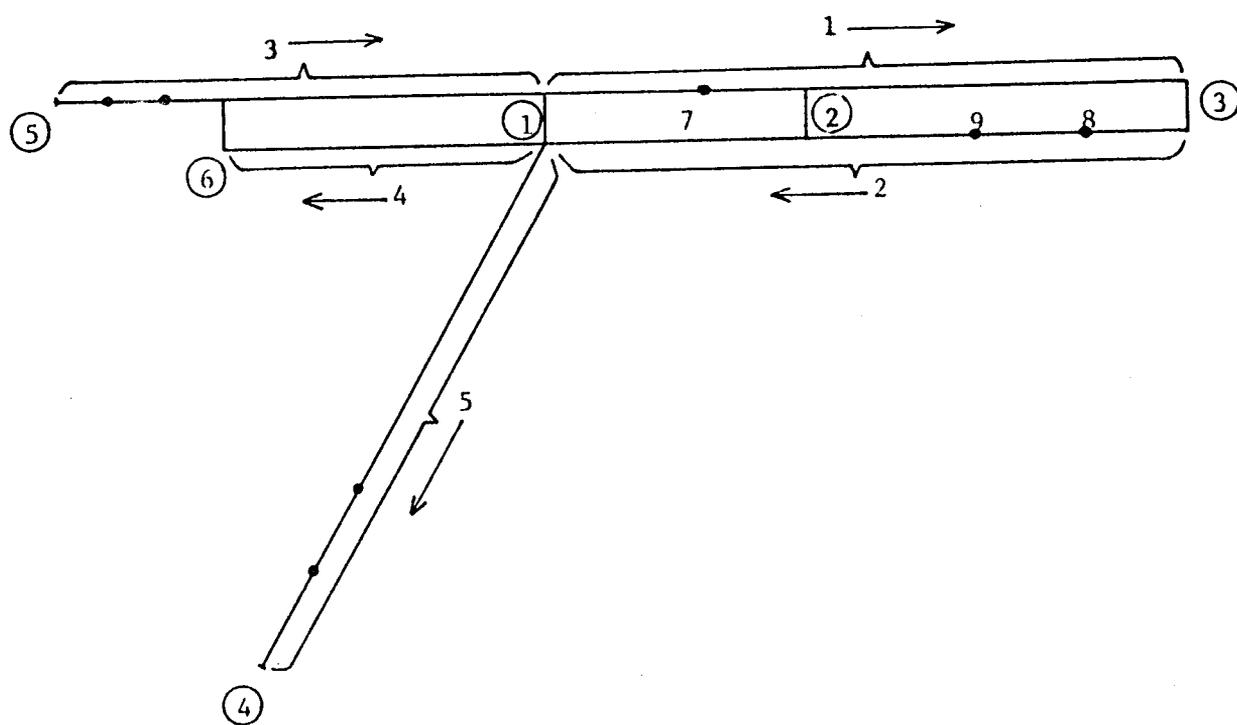


Fig. 6.4 Uma rede eléctrica num certo instante. Os nós marcados com uma circunferência são nós fixos. Com chavetas estão marcados os ramos ferroviários.

BEGIN

Número de nós := NFIX; (número de nós fixos)

Número de linhas := 0 ;

FOR cada ramo R da rede ferroviária DO

BEGIN

Obtenha o 1º nó (fixo) N1 do ramo R; (posição X1)

REPEAT

Obtenha o nó seguinte N2 que pode ser um nó fixo ou um comboio,  
e a sua posição X2;

IF N2 é um comboio THEN

Número de nós := Número de nós + 1;

Número de linhas := Número de linhas + 1;

Calcula a impedância da nova linha N1 → N2 a partir da impedância quilométrica e da distância X2 - X1 (que deve ser superior a um certo valor mínimo)

Actualizar a susceptância à terra de N1 e N2

N1 := N2;

X1 := X2

UNTIL N2 = nó final (fixo) do ramo R

END

END

Fig. 6.5 Algoritmo de construção da rede eléctrica.

BEGIN

Inicializaçãõ de todas as estruturas de informaçaõ;

T:= TINIT: (tempo inicial de simulaçaõ)

REPEAT

Acontecimento:= Acontecimento da lista (do tipo H) com menor instante de ocorrênciã, CEVT.

IF CEVT - T  $\geq$  valor mĩnimo (sõ hã iteraçaõ se DT = CEVT - T nãõ for demasiado pequeno) THEN

BEGIN

REGCNT; (controle de todos os comboios nãõ sujeitos a protecções, fixando-se os valores das variãveis de comando)

SOLVE; (sãõ resolvidas as equações estãticas - elãctricas e de tracçaõ - para o instante actual)

INCRIT; (o estado do sistema e as equações sãõ actualizados para o instante CEVT)

EXESFT; (todos os acontecimentos do tipo S ocorridos no intervalo [T, CEVT] sãõ detectados e "executados")

END;

EXEVT; (ẽ executado o acontecimento (de tipo H) que originou o instante actual de discretizaçaõ)

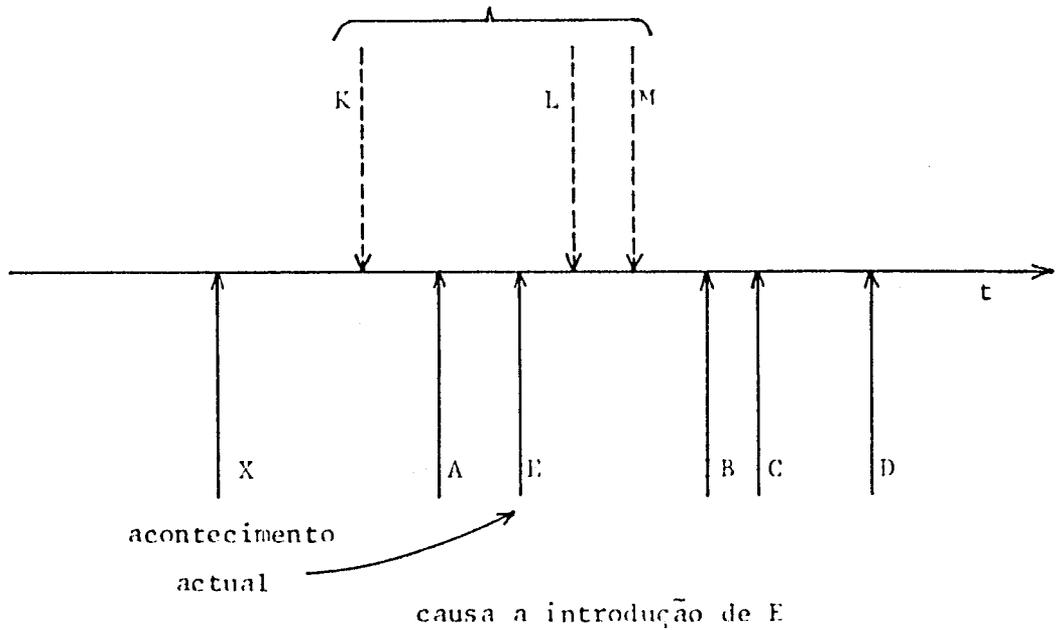
NXTEV (ẽ detectada a possĩvel ocorrênciã prõxima de acontecimentos do tipo H2)

UNTIL T  $\geq$  TFINAL.

END

Fig. 6.6 Algoritmo geral do programa de simulaçaõ com inclusãõ de acontecimentos discretos.

Possíveis acontecimentos do tipo H2: s̃o entram na lista se se o seu tempo de ocorr̃encia for inferior ao menor dos que est̃ao na lista



Lista antes da execuç̃ao do acontecimento actual: {X, A, B, C, D, K}

Lista ap̃os a execuç̃ao do acontecimento actual: {A, E, B, C, D, K}

Fig. 6.7 Acontecimentos na lista.

CAPÍTULO 7

ESQUEMAS DE CONTROLE

## 7. ESQUEMAS DE CONTROLE

### 7.1 Introdução

O problema da simulação, onde as equações dinâmicas do sistema são resolvidas, é distinto do problema da regulação (ou controle) que consiste na fixação de um algoritmo que determina as variáveis de entrada no sistema a partir dos objectivos a atingir. Não se pretende com a simulação desenvolvida determinar estes objectivos, mas apenas implementar um esquema flexível que permita (possivelmente após extensões apropriadas) ao utilizador simular um determinado mecanismo de controle.

Quanto à metodologia a adoptar sugerimos a seguinte:

- (1) escolher um método de controle
- (2) modificar, se necessário, o programa para o poder implementar
- (3) traduzir esse método num conjunto de instruções de controle.

O passo (2) só para métodos muito elaborados deverá ser necessário pois as instruções de controle já implementadas são bastante flexíveis.

Neste capítulo discutiremos sucessivamente os seguintes aspectos: descrição do método usado, escolha da variável de controle, descrição das instruções de controle implementadas e sua comparação.

Deve-se sublinhar que, devido à distinção mal definida entre controle e simulação e à complexidade do controle real, o método escolhido, embora não seja perfeitamente geral, é bastante flexível, prestando-se bem a

melhoramentos futuros (que se traduzirão na introdução de novas instruções de controle).

## 7.2 Descrição genérica do método utilizado

Cada comboio no sistema aponta para um determinado caminho que é uma sequência de ramos da rede ferroviária:

$$TR \rightsquigarrow \text{PATH}(TR)$$

Por outro lado corresponde também a cada comboio uma estrutura chamada horário de tal forma que, sempre que o horário é o mesmo, o caminho também o é:

$$\text{TABLE}(TR1) = \text{TABLE}(TR2) \implies \text{PATH}(TR1) = \text{PATH}(TR2)$$

O horário (TABLE) contém um conjunto de instruções de regulação correspondentes ao caminho respectivo. Os tempos contidos em cada horário são tempos relativos ao momento inicial e por isso cada comboio tem uma origem dos tempos (OFFSET(TR)) própria que deve ser adicionada àqueles tempos.

Esta estrutura resulta, em parte, da observação dos horários dos vários comboios no mesmo percurso, os quais frequentemente se podem agrupar em conjuntos cujos elementos diferem apenas na origem dos tempos.

Esta estrutura está representada esquematicamente na figura 7.1.

Na figura 7.2 pretendemos mostrar, em linhas gerais, o método usado. Cada comboio aponta para um horário constituído por um conjunto de instruções de controle. O controle propriamente dito é um algoritmo cujas en-

tradas são variáveis de estado dos comboios e a instrução de controle respectiva e cuja saída é a variável de comando para esse comboio. Conforme está indicado, as imposições resultantes das restrições de protecção têm prioridade sobre os mecanismos de controle.

É importante observar que o controle é independente para cada comboio, isto é, apenas as variáveis de estado correspondentes a esse comboio influenciam o seu controle. A interação entre os comboios está implícita nas condições de protecção. Esta é a filosofia do controle independente que é geralmente preferida por considerações de simplicidade e segurança. Todavia haveria benefícios num controle centralizado capaz de observar o estado de todos os comboios e de escolher a grandeza das respectivas variáveis de comando. Na realidade, só pela utilização de um controle global será possível manter o sistema num percurso óptimo relativamente a um certo objectivo.

Foi decidido simular neste trabalho apenas o controle do tipo independente por ser geralmente o único utilizado na prática.

### 7.3 A variável de comando

Um certo número de variáveis relacionadas entre si podem ser escolhas possíveis para variáveis de comando. A figura 7.3 ilustra este aspecto.

Este problema é comum nos modelos matemáticos de sistemas e traduz uma certa indefinição na fronteira entre os algoritmos de controle e as equações dinâmicas do sistema.

A variável de comando que foi escolhida é a força de tracção sendo es

ta opção influenciada pelas seguintes considerações:

— é vantajosa a escolha de uma variável razoavelmente próxima dos objectivos de controle (que se traduzem em termos de tempo, posições e velocidades) para simplificar e aumentar o rigor dos algoritmos de controle

— por uma questão de generalidade não desejaríamos que os algoritmos de controle dependessem de um tipo particular de locomotiva ou até de uma classe de tracção (eléctrica ou não).

As consequências de uma escolha deste género não se traduzem numa redução do rigor das aproximações ou da generalidade do método, mas antes numa transferência da complexidade dos algoritmos de controle para as características das locomotivas. Assim (como se refere no capítulo 5) os algoritmos que caracterizam os diversos tipos de locomotivas recebem como dada uma certa força de tracção pretendida e fornecem a força de tracção real, resultante das várias restrições existentes (força de tracção máxima, potência máxima, possível caracter discreto do graduador de comando, etc.) que aproxima a força de tracção pedida.

#### 7.4 Instruções de controle na versão actual do programa

Cada instrução de controle é codificada num trio de valores (parâmetro 1, código da instrução, parâmetro 2), existindo actualmente as seguintes instruções:

## 1 - PARAGEM EM X0 NO INSTANTE T0

Codificação (X0, 3, T0)

Em todas as instruções designaremos por X0 a distância desde o início do caminho, por T0 o tempo relativo ao momento de entrada, por x a localização actual do comboio no caminho respectivo e por v a sua velocidade.

O objectivo a atingir com esta instrução é parar o comboio no ponto  $x = X0$ , se possível no instante T0.

O método normalmente usado é o seguinte (fig. 7.4A):

na situação I o comboio vai procurar manter-se até X0' a uma velocidade V' constante calculada de acordo com o objectivo; na situação II o comboio está a travar segundo a desaceleração nominal e na situação III o comboio tenta travar segundo a desaceleração a' (o que não será possível se  $a' > \text{máxima desaceleração possível}$ ).

Os cálculos relativos a esta instrução são os seguintes:

seja  $\Delta x = X0 - x$  (distância que falta percorrer)

e  $\Delta t = T0 - T$  (tempo até à paragem)

Distinguímos os seguintes casos:

I)  $a \Delta t^2 > 2 \cdot \Delta x$  (situação I da fig. 7.4)

Neste caso adopta-se como objectivo a velocidade V' necessária para que o comboio ao percorrer uma trajectória constituída por uma primeira parte à velocidade constante V' seguida por uma segunda parte à desaceleração constante (nominal) a, pare no instante T0; a velocidade V' é dada

por:

$$v' = a \Delta t - \sqrt{a^2 \Delta t^2 - 2a \Delta x} \quad (7.1)$$

a força de tracção pretendida (para que a velocidade seja  $v'$  no final do intervalo  $[T, T + DT]$  será:

$$F_t = \frac{(v' - v) \cdot \text{massa}}{DT} + F' \quad (7.2)$$

em que  $F'$  representa uma força destinada a compensar os efeitos resultantes dos atritos, resistências e declive.

$$\text{II) } a \Delta t^2 = 2 \Delta x$$

Nesta situação adopta-se como objectivo a velocidade no instante

$T + DT$ :

$$v' = v - aDT$$

correspondente à desaceleração nominal  $a$ .

$$\text{III) } a \Delta t^2 < 2 \Delta x$$

Nesta situação o comboio encontra-se atrasado relativamente ao horário e a decisão tomada depende da velocidade actual do comboio:

(1) Se  $v^2 < 2a \Delta x$  a velocidade objectivo para  $T + DT$  toma o maior valor possível para recuperar o atraso.

(2) Se  $v^2 \geq 2a \Delta x$  o objectivo corresponde a uma desaceleração constante  $a' = v^2/2 \Delta x$ , sendo a velocidade pretendida em  $T + DT$ :

$$v' = v - a'DT$$

No gráfico da figura 7.4 estão discriminadas as várias situações possíveis num diagrama  $(x, t)$ ; neste diagrama a velocidade num certo ponto é

representada pelo declive da trajectória nesse ponto.

## 2 - PASSIVAÇÃO EM X0 NO INSTANTE T0

Codificação (X0, 4, T0)

Semelhante à instrução anterior mas após a paragem do comboio ele é retirado do ramo que ocupava ficando numa forma passiva até à instrução indicada em 5.

## 3 - FIM DE PERCURSO

Codificação (-, 5, -)

A execução desta instrução traduz-se na eliminação do comboio respectivo do sistema, terminando toda a sua actividade e sendo impossível a sua reentrada na rede.

## 4 - ARRANQUE NO INSTANTE T0

Codificação (-, 6, T0)

Esta instrução causa no momento T0 o arranque de um comboio parado, segundo as instruções seguintes do horário.

## 5 - ACTIVAÇÃO NO INSTANTE T0 SE PROG N

Codificação (N, 7, T0)

O comboio respectivo que se encontrava no estado passivo executa o programa de protecção designado pelo número N e, se o resultado desse programa for "VERDADE", é inserido na rede ferroviária (no local onde se encontra) ficando sujeito à regulação das instruções seguintes.

## 6 - FIXAÇÃO DA MASSA EM M

Codificação (-, 2, M)

A massa do comboio respectivo (que deverá estar no estado parado ou passivo) passa a ser M.

## 7 - MUDANÇA PARA O RAMO N NO PONTO X0

Codificação (X0, 9, N)

O comboio respectivo (que deverá estar no estado passivo) passa para o ramo designado pelo inteiro N, sendo colocado à distância X0 da sua origem.

## 8 - PASSAGEM POR X0 NO INSTANTE T0

Codificação (X0, 10, T0)

O objectivo é passar no instante T0 pelo ponto X0; sendo:

$V' = (X0 - x)/(T0 - T)$  (velocidade pretendida no momento  $T + DT$ ), a força de tracção requerida é calculada segundo a expressão 7.2. Note-se que a regulação é continuamente efectuada por forma a tentar satisfazer o objectivo no instante T0.

## 9 - PASSAGEM POR X0 COM A VELOCIDADE V0

Codificação (X0, 11, V0)

O objectivo é passar pelo ponto X0 com a velocidade V0. É utilizada uma aceleração constante (fig. 7.5).

Sendo:

$$V' = v + DT \cdot (V0 - v) \cdot (V0 + v) / (2 \cdot (X0 - x)),$$

a força de tracção é calculada segundo a fórmula 7.2.

#### 10 - FIXAÇÃO DA VELOCIDADE EM $V_0$ ATÉ $X_0$

Codificação ( $X_0, 12, V_0$ )

Até ao ponto  $X_0$  a velocidade é mantida (se possível) no valor

$V_0$  :

$$V' = V_0 \text{ (constante)}$$

#### 11 - \*PASSAGEM POR $X_0$ NO INSTANTE $T_0$

Codificação ( $X_0, 13, T_0$ )

A velocidade requerida:

$$V' = \frac{X_0 - x}{T_0 - T} \text{ (constante, calculada no início)}$$

é inicialmente calculada e será mantida, se possível até  $x = X_0$ .

Note-se que as duas últimas instruções não são de regulação contínua quanto ao objectivo.

As últimas 4 instruções são as instruções básicas da regulação em andamento, podendo aproximar grande parte dos métodos de controle que se podem pretender. É todavia possível aumentar a variedade de instruções com vista a melhor simular outros métodos de controle.

### 7.5 Comparação entre algumas das instruções de controle

A figura 7.6 ilustra a diferença entre as instruções "PASSAGEM" e "\*PASSAGEM".

Na instrução "PASSAGEM" a regulação é contínua e, em geral, o objectivo a atingir no final do intervalo de regulação é conseguido com bastante rigor. Por exemplo no intervalo B, após o atraso causado pela limitação de velocidade há uma recuperação de tempo através da aceleração ao máximo antes de X0'. Ao contrário a instrução "\*PASSAGEM" tenta satisfazer em cada momento uma velocidade pré-calculada e por isso não há auto-recuperação de atrasos ou avanços (causados por exemplo por uma travagem inicial até à velocidade pretendida) dentro da zona respectiva. Todavia há recuperação de zona para zona pois a velocidade pré-calculada em X0' tem em conta o atraso (ou avanço) actual do comboio.

Ambas estas instruções podem classificar-se como instruções de tempo pois o objectivo a atingir é a passagem por um ponto num instante de tempo.

As instruções "PASSAGEM COM A VELOCIDADE", "FIXAÇÃO DA VELOCIDADE" são instruções de velocidade em que a velocidade é regulada durante o intervalo para satisfazer valores calculados durante a elaboração dos horários.

Na figura 7.7 comparam-se estas duas instruções que, contrariamente às referidas anteriormente, não corrigem eventuais desvios dos horários pois referem velocidades pré-fixadas.

Observa-se que a instrução "FIXAÇÃO DA VELOCIDADE" tende a manter uma velocidade constante enquanto a instrução "PASSAGEM COM A VELOCIDADE" tende a manter uma aceleração constante.

Embora se possam incluir descontinuidades nos limites da velocidade dentro de uma zona de regulação (como fizemos atrás) é em geral aconselhável tê-las em consideração na elaboração do programa de regulação, tal como está indicado na figura 7.8.

De uma forma mais geral devem ter-se em conta na elaboração dos programas de regulação outros factores tais como:

- mudanças de declive
- aproximação de cruzamentos
- condições de carga da rede eléctrica.

## 7.6 Conclusões

A elaboração pelo utilizador de um programa de regulação que é interpretado e executado durante a simulação é um método bastante flexível permitindo aproximar várias situações reais; o utilizador deve ter em consideração que a escolha de programas de regulação (horários) que imitem o melhor possível a realidade é extremamente importante sob o ponto de vista dos efeitos causados nos resultados da simulação.

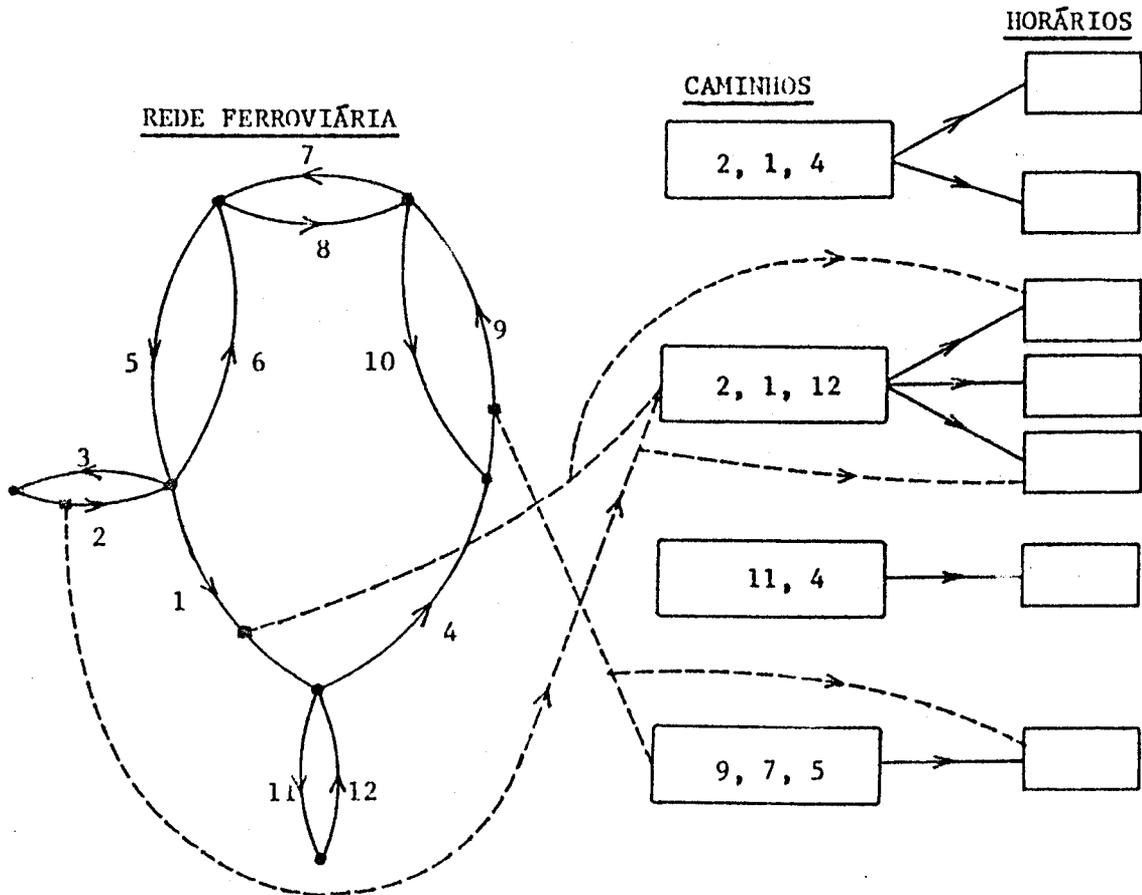


Fig. 7.1 Representação de uma rede ferroviária com indicação dos caminhos e horários associados aos comboios; a tracejado estão indicados apontadores dos comboios para os caminhos e horários.

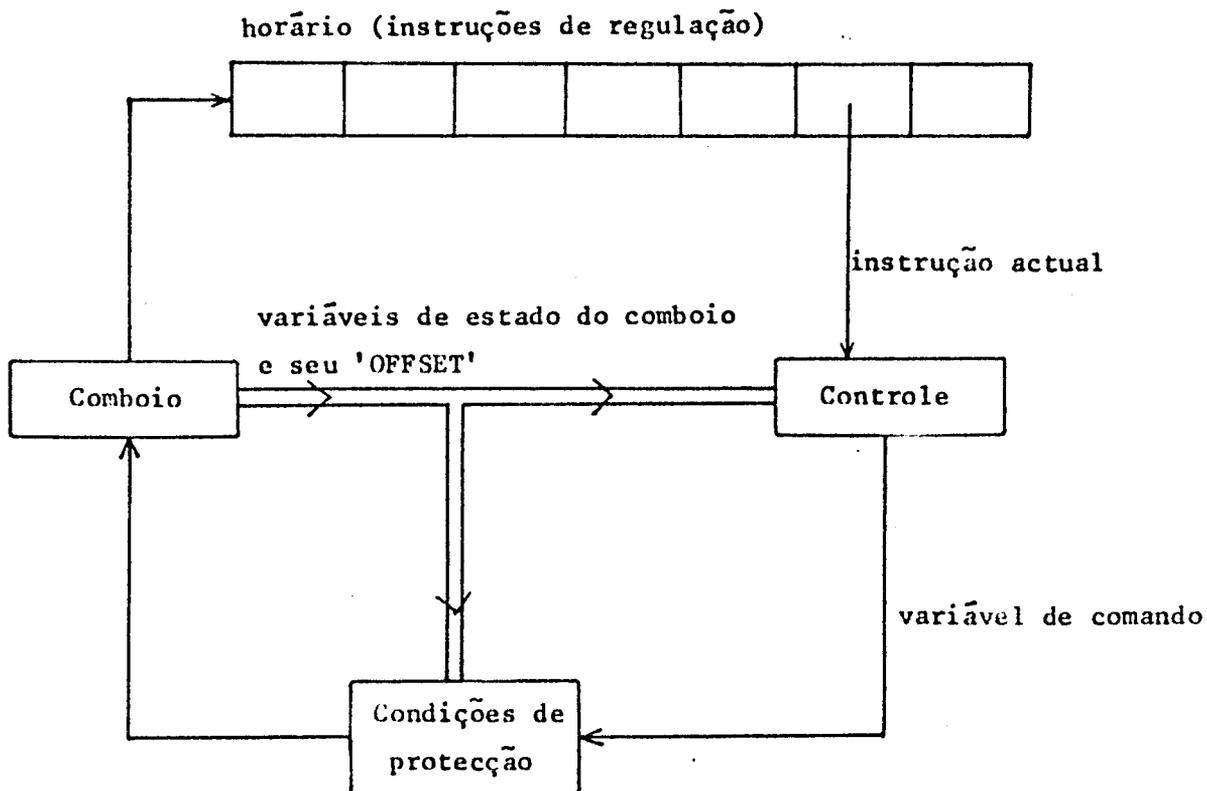


Fig. 7.2 Relações entre os horários, o controle e as protecções.

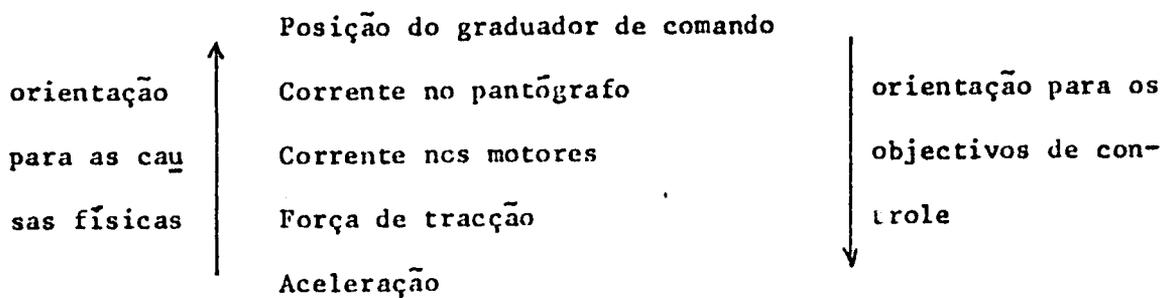


Fig. 7.3 Escolha da variável de comando.

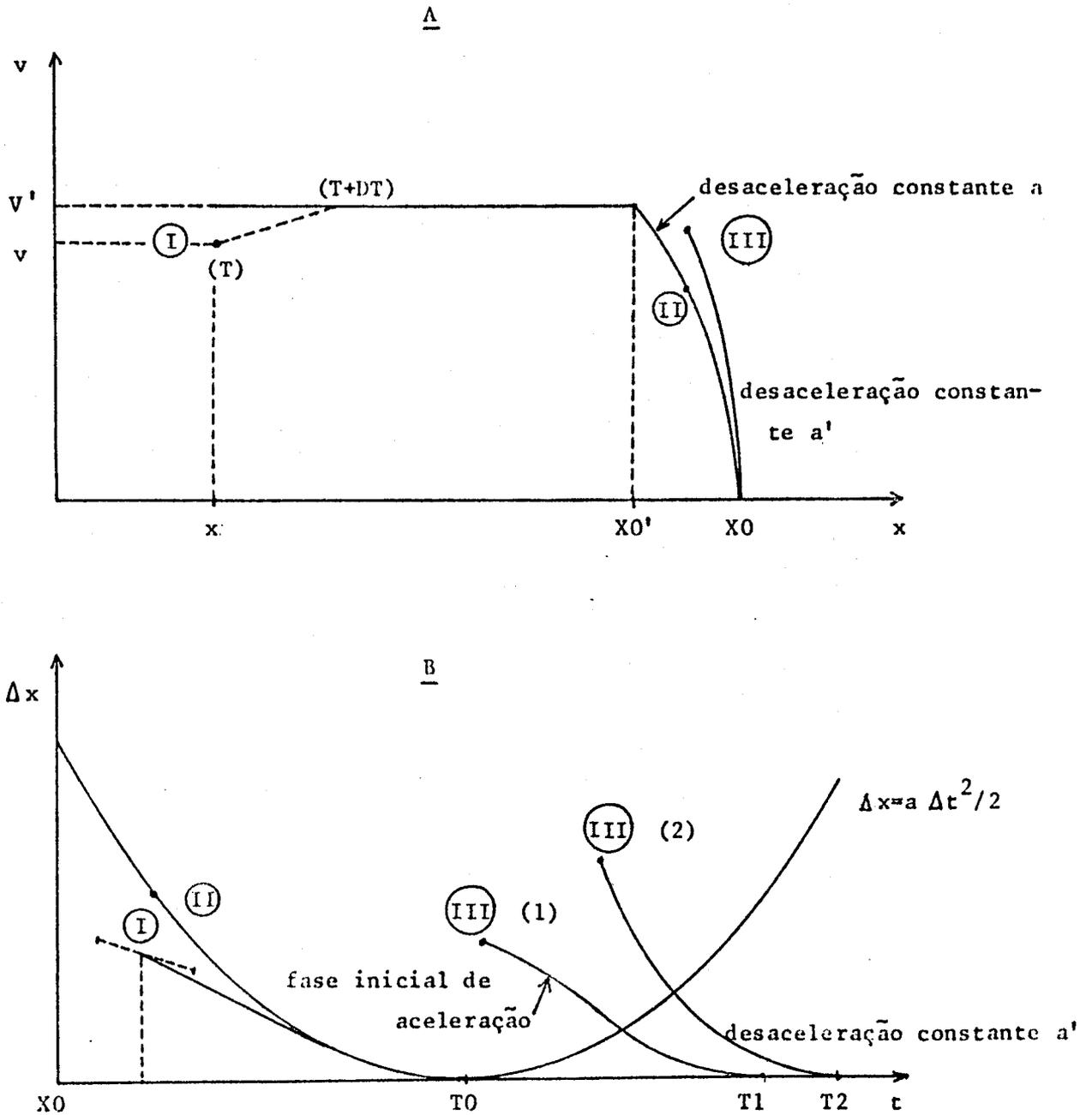


Fig. 7.4 Representação de várias situações possíveis relativamente à instrução "PARAGEM EM  $X_0$  NO INSTANTE  $T_0$ "; em A: diagrama  $(x, v)$ ; em B: diagrama  $(x, t)$ ;  $T_1 - T_0$  e  $T_2 - T_0$  são os atrasos na paragem nos casos III(1) e III(2) respectivamente.

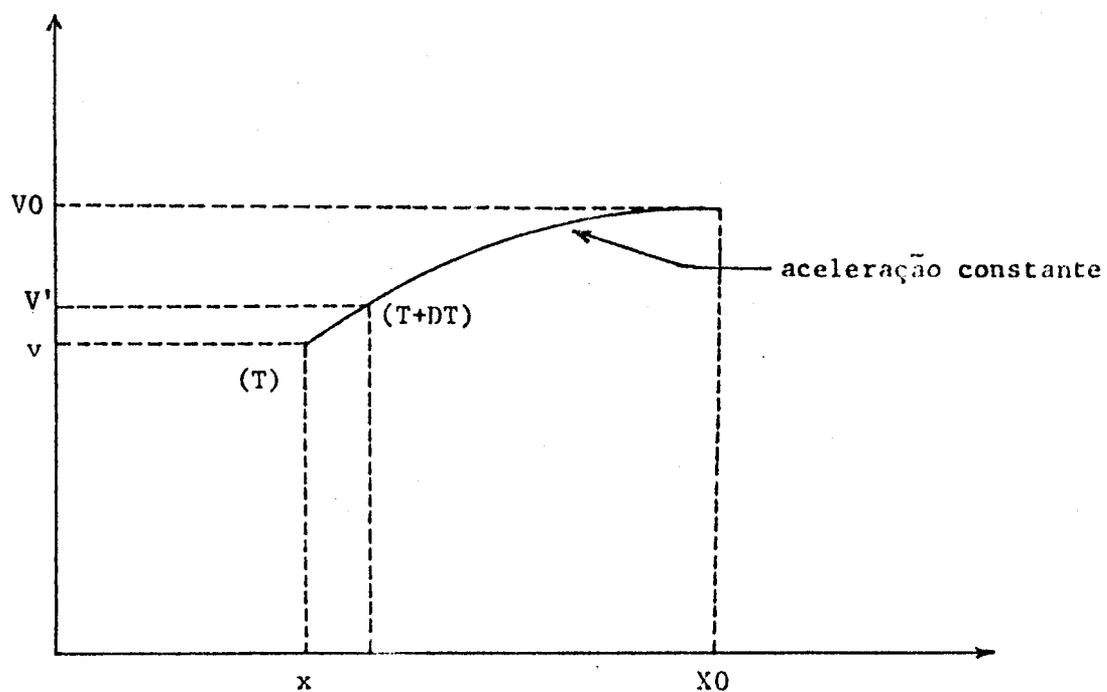


Fig. 7.5 Representação do objectivo a conseguir na instrução "PASSAGEM POR  $X_0$  COM A VELOCIDADE  $v_0$ ".

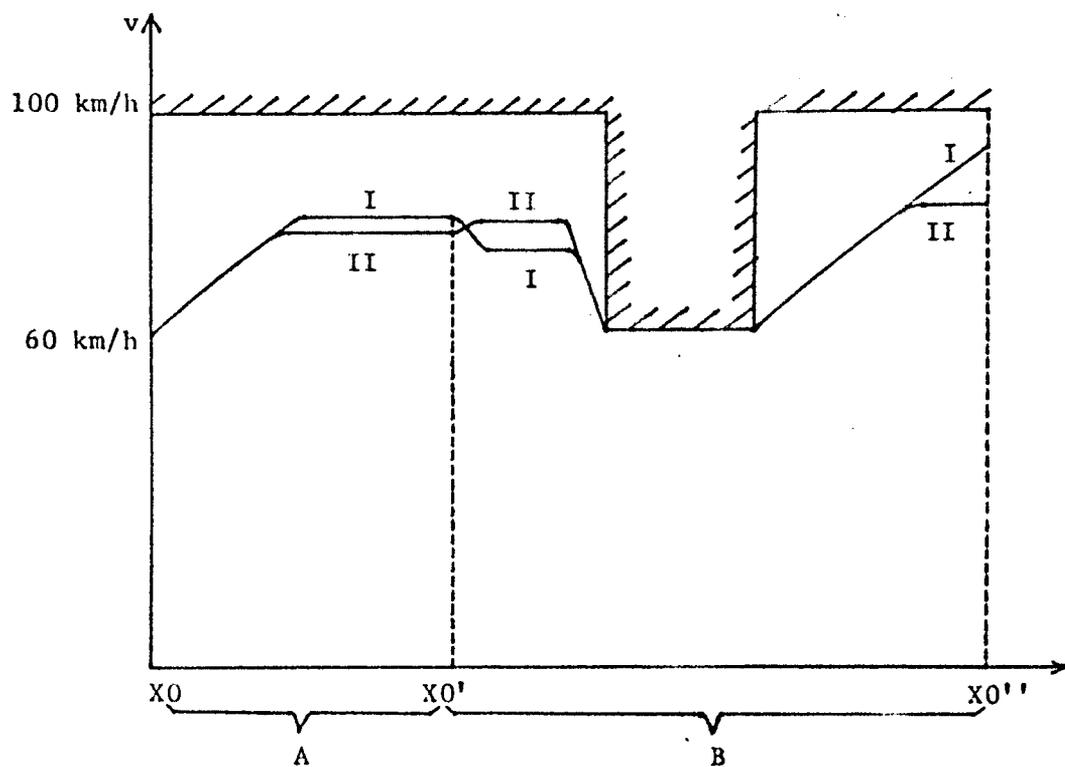


Fig. 7.6 Comparação de trajetórias num diagrama  $(x,v)$ :

I: com instruções: A: PASSAGEM POR  $X0'$  NO INSTANTE  $T0'$

B: PASSAGEM POR  $X0''$  NO INSTANTE  $T0''$

II: com instruções: A: \*PASSAGEM POR  $X0'$  NO INSTANTE  $T0'$

B: \*PASSAGEM POR  $X0''$  NO INSTANTE  $T0''$

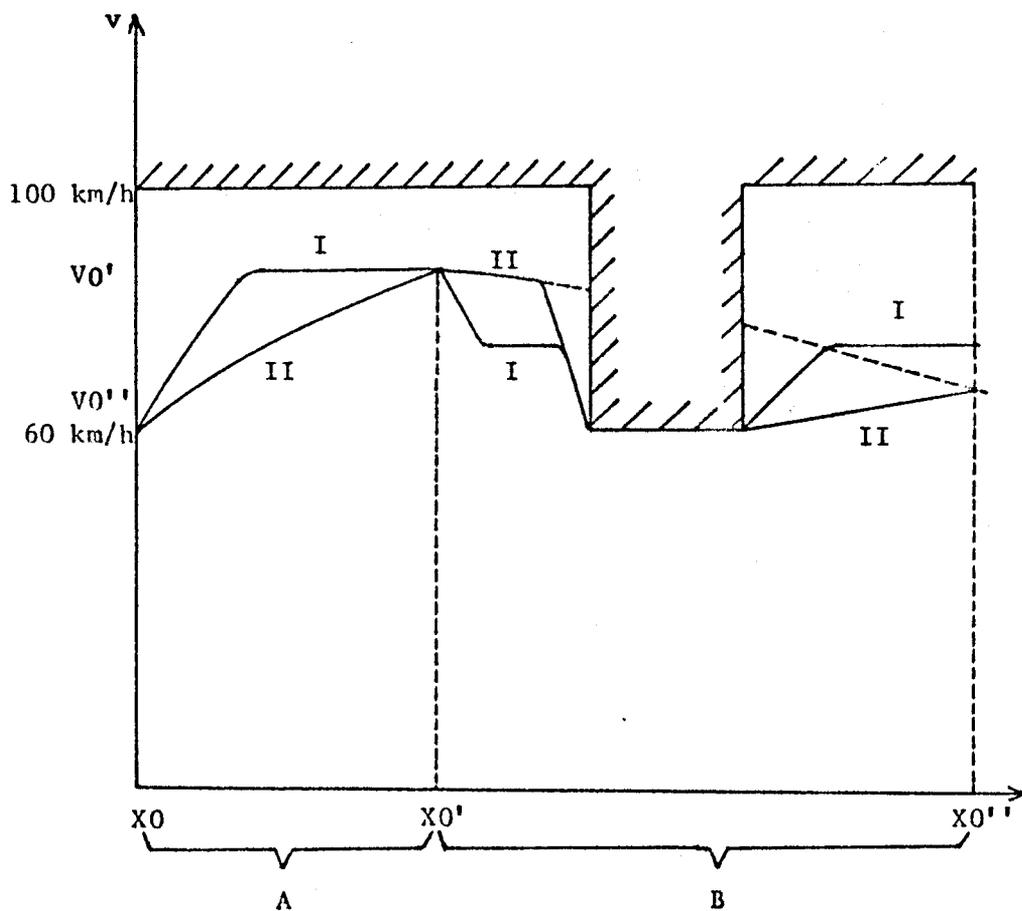


Fig. 7.7 Comparação de trajetórias num diagrama  $(x, v)$ :

- I: com instruções: A: FIXAÇÃO DA VELOCIDADE EM  $v_0'$  ATÉ  $x_0'$   
 B: FIXAÇÃO DA VELOCIDADE EM  $v_0''$  ATÉ  $x_0''$
- II: com instruções: A: PASSAGEM POR  $x_0'$  COM VELOCIDADE  $v_0'$   
 B: PASSAGEM POR  $x_0''$  COM VELOCIDADE  $v_0''$

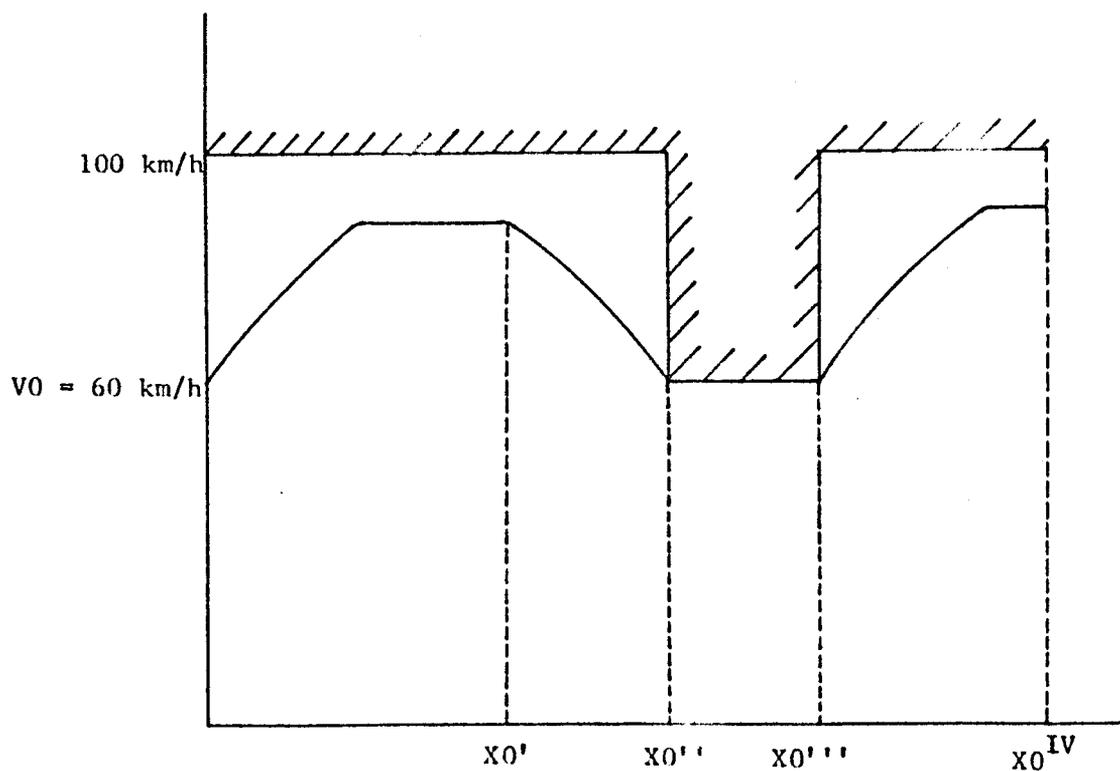


Fig. 7.8 Exemplo de um horário tomando em consideração as limitações de velocidade.

Instruções: A: PASSAGEM POR  $x_0'$  NO INSTANTE  $t_0'$

B: PASSAGEM POR  $x_0''$  COM VELOCIDADE  $v_0$

C: FIXAÇÃO DA VELOCIDADE EM  $v_0$  ATÉ  $x_0'''$

D: PASSAGEM POR  $x_0^{IV}$  NO INSTANTE  $t_0''$

CAPÍTULO 8

ESQUEMAS DE PROTECÇÃO

## 8. ESQUEMAS DE PROTECÇÃO

### 8.1 Introdução

A distinção entre protecção e controle dos comboios em evolução numa rede ferroviária é algo artificial mas reflecte a necessidade habitual em problemas complexos da subdivisão em sub-problemas mais simples tanto quanto possível independentes.

Entendemos como esquemas de protecção os métodos utilizados para obrigar à satisfação de um conjunto de restrições impostas ao problema e como esquemas de regulação os métodos de controle relativamente livre de restrições (escolha das variáveis de comando tendo em consideração o estado actual e os objectivos a atingir).

A origem da distinção referida pode ser interpretada como resultante (em parte) do facto de a regulação livre do movimento do sistema ser basicamente independente para os vários comboios (desacoplado) isto é cada um toma em consideração apenas o seu estado e não o estado global do sistema.

É plausível que, com o desenvolvimento da capacidade de processamento local (em tempo real) e da rede de telecomunicações, a protecção seja integrada num esquema de regulação geral (como já se faz em parte - ver [15] ) mas, para já, considerações de segurança e simplicidade levam ao esquema básico da figura 8.1.

Neste capítulo representamos uma teoria básica dos esquemas de protecção baseada na consideração de acontecimentos e predicados de protecção.

Mencionamos depois esquemas de protecção local um pouco mais elaborados. Terminamos com a descrição dos algoritmos de protecção utilizados no programa geral de simulação que é a base deste trabalho. Como se verá, o método usado é bastante flexível (dentro das restrições que à priori foram impostas).

Os esquemas utilizados podem ser aplicados ao modelamento de outras situações (que não desenvolveremos), nomeadamente:

- simulação dos blocos de sinalização
- simulação da capacidade finita das estações.

## 8.2 Predicados de protecção local

Vamos, através de exemplos, formular os predicados de protecção local, isto é, expressões booleanas que traduzem as considerações de segurança em zonas como cruzamentos, vias simples, etc.

### Exemplo 1

Considerando o cruzamento da figura 8.2 e designando

$N_1$ : número de comboios no troço AC

$N_2$ : número de comboios no troço BD

Temos que este "conflito" é representado pelo predicado

$$( (N_1 = 0) \vee (N_2 = 0) ) \wedge (N_1 \geq 0) \wedge (N_2 \geq 0)$$

Exemplo 2

Na figura 8.3 o gráfico representa uma porção de via única (entre X e Y) de uma rede ferroviária.

$N_1$ : número de comboios no troço AB

$N_2$ : número de comboios no troço CD

A condição de via única (não podem circular comboios simultaneamente em sentidos contrários) é

$$( (N_1 = 0) \vee (N_2 = 0) ) \wedge (N_1 \geq 0) \wedge (N_2 \geq 0)$$

Exemplo 3

Observando agora a figura 8.4 que representa um entroncamento em via dupla e designando

$N_1$ : número de comboios em AB

$N_2$ : número de comboios em FB

$N_3$ : número de comboios em CE

$N_4$ : número de comboios em CD

vemos que temos um cruzamento (X) e um entroncamento (Y).

O predicado de protecção é:

$$( (N_1 = 0) \vee (N_2 = 0) ) \wedge ( (N_3 = 0) \vee (N_2 = 0) ) \wedge (N_1 \geq 0) \wedge (N_2 \geq 0) \wedge (N_3 \geq 0)$$

Notemos que a escolha de variáveis reflecte o caminho seguido por cada comboio, em particular,  $(N_4 = 0) \vee (N_2 = 0)$  não entra no predicado de protecção.

Exemplo 4

No "triângulo" de via dupla da figura 8.5 sejam  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$  o número de comboios respectivamente em AB, AC, FB, FE, DE, DC. Os cruzamentos X, Y, Z e os entroncamentos X' Y' Z' traduzem-se no predicado de protecção:

$$(N_2 = 0 \vee N_3 = 0) \wedge (N_3 = 0 \vee N_5 = 0) \wedge (N_2 = 0 \vee N_5 = 0) \wedge$$

$$(N_2 = 0 \vee N_6 = 0) \wedge (N_3 = 0 \vee N_1 = 0) \wedge (N_4 = 0 \vee N_5 = 0) \wedge$$

$$(N_1 \geq 0) \wedge (N_2 \geq 0) \wedge (N_3 \geq 0) \wedge (N_4 \geq 0) \wedge (N_5 \geq 0) \wedge (N_6 \geq 0)$$

Em conclusão: os predicados de protecção local traduzem a ideia de "secções críticas" de via férrea (isto é onde não é possível o acesso simultâneo de certos comboios) e revestem na formulação inicial a forma conjuntiva normal ([6]).

### 8.3 Estabelecimento e verificação dos predicados de protecção

Podemos implementar o esquema de protecção definindo duas operações básicas (acontecimentos):

CHEGA ( $\Lambda, AB$ ): o comboio chega ao ponto  $\Lambda$  do percurso AB; seja  $N_i$  a variável correspondente ao ramo AB; então o esquema de protecção será:

```

{ P }
IF P(Ni → Ni+1) THEN
  BEGIN
    ENTRA (AB);
    Ni := Ni+1
  END
ELSE ESPERA
{ P }

```

em que  $P(N_i \rightarrow N_i+1)$  é o predicado de protecção com a substituição de  $N_i$  por  $N_i+1$ ; o significado de  $\{P\}$  no início e no fim do algoritmo é o seguinte: se  $P$  é válido no princípio então também é válido após a execução.

SAI (B,AB): o comboio chega ao ponto B do percurso AB, deixando esta secção. Se  $N_i$  é o número de comboios em AB então o esquema de protecção será:

```

{ P ∧ (Ni ≥ 1) }
BEGIN
  passa por B;
  Ni := Ni-1
END
{ P }

```

A demonstração formal da invariância de  $P$  com estas operações (e em geral) não é difícil atendendo a que:

(i) inicialmente  $P$  é suposto verdadeiro

ex:  $P(N_1=0, \dots, N_k=0)$  é verdadeiro

(ii)  $\{P(N_i \rightarrow N_i+1)\} \quad N_i := N_i+1 \quad \{P\}$  (operação CHEGA e ENTRA)

(iii)  $\{P \wedge (N_i \geq 1)\} \quad N_i := N_i-1 \quad \{P\}$

Observação: as operações CHEGA e SAI são consideradas indivisíveis isto é uma vez iniciadas não podem ser interrompidas; se assim não fosse o predicado de protecção poderia deixar de ser verdadeiro.

Por exemplo para a figura 8.2 o esquema de protecção será:

CHEGA (A,AC):

IF  $((N_1+1=0) \vee (N_2=0)) \wedge (N_1 \geq 0) \wedge (N_2 \geq 0)$  THEN

BEGIN

ENTRA (AC);

$N_1 := N_1+1$

END

ELSE ESPERA

SAI (C,AC):

BEGIN

PASSA POR C;

$N_1 := N_1-1$

END;

depois de simplificar a expressão booleana temos

CHEGA (A,AC):

IF  $(N_2=0)$  THEN

BEGIN

ENTRA (AC);

$N_1 := N_1+1$

END

ELSE ESPERA

SAI (C,AC):

BEGIN

PASSA POR C;

$N_1 := N_1 - 1$

END;

Identicamente obtemos resultados análogos para o ramo BD.

Deve-se notar que as condições do tipo  $N_i \geq 0$  podem ser excluídas dos predicados pois é fácil ver-se que, sendo inicialmente satisfeitas, elas não são destruídas pelas equações CHEGA ou SAI (atendendo ao significado de  $N_i$ ).

A inclusão de condições do tipo  $0 \leq N_i \leq a$  pode facilmente obter-se usando apenas comparações com zero das variáveis

$$N_i \text{ e } N_i^! \equiv a - N_i$$

onde  $N_i^!$  é o número de lugares vagos.

Por exemplo, se na figura 8.6 pretendermos limitar a 1 e 2 respectivamente o número de comboios em AC e BC, teremos o seguinte predicado de protecção:

$$(N_1 \geq 0) \wedge (N_1^! \geq 0) \wedge (N_2 \geq 0) \wedge (N_2^! \geq 0) \wedge (N_3 \geq 0) \wedge$$

$$\wedge (N_1 = 0 \vee N_2 = 0) \wedge (N_1 = 0 \vee N_3 = 0) \wedge (N_2 = 0 \vee N_3 = 0)$$

onde  $N_1, N_2, N_3$  são os comboios em AC, BC e DE respectivamente e  $N_1^! \equiv 1 - N_1$ ,

$$N_2^! \equiv 2 - N_2.$$

#### 8.4 Programas de protecção

Um programa de protecção local (num ponto A) é o conjunto de todas as operações básicas efectuadas no ponto A sobre os comboios, isto é o conjunto de operações do tipo

CHEGA (A, AX)

SAI (A, YA)

onde AX são ramos com origem em A e YA ramos que terminam em A.

Portanto o programa local envolve instruções que permitem para cada comboio que chega a A:

(1) detectar o ramo que está a ser percorrido por esse comboio (no programa realizado a selecção é feita pelos caminhos e não pelos ramos o que torna o método mais flexível)

(2) aplicar as operações respectivas.

Por exemplo na figura 8.7 temos o predicado de protecção

$P: ((N_1=0) \vee (N_2=0)) \wedge (N_1 \geq 0) \wedge (N_2 \geq 0)$  sendo

$N_1$ : número de comboios em AC

$N_2$ : número de comboios em BC

Usando a metodologia apresentada, agrupamos em C as duas operações SAI (C,AC), SAI (C,BC), obtendo os seguintes programas de protecção locais:

em A: (CHEGA(A,AC))

```
IF  $N_2=0$  THEN
  BEGIN
    ENTRA (AC);
     $N_1:=N_1+1$ 
  END
  ELSE ESPERA
```

em B: (CHEGA(B,BC))

```
IF  $N_1=0$  THEN
  BEGIN
    ENTRA (BC);
     $N_2:=N_2+1$ 
  END
  ELSE ESPERA
```

em C: (SAI(C,AC) e SAI(C,BC))

```
IF RAMO = AC THEN
  BEGIN
    PASSA POR C;
     $N_1:=N_1-1$ 
  END
  IF RAMO = BC THEN
  BEGIN
    PASSA POR C;
     $N_2:=N_2-1$ 
  END
```

### 8.5 Estabelecimento menos geral dos predicados de protecção

Pode ser mais simples estabelecer um predicado de protecção  $Q$  que implique o predicado original  $P$  mas mais restrito que este.

Exemplo:

$$P \equiv (N_1 \geq 0) \wedge (N_2 \geq 0) \wedge ((N_1=0) \vee (N_2=0))$$

Um  $Q$  (trivial e pouco útil) que implique  $P$  será:

$$Q: (N_1=0) \wedge (N_2=0)$$

Outro  $Q$  mais restrito que  $P$  é por exemplo:

$$Q': 0 \leq N \leq 1$$

onde  $N$  representa a soma  $N_1+N_2$ , isto é apenas um comboio tem acesso à zona protegida, independentemente do percurso.

Usando  $Q'$  na figura 8.7 obtemos (independentemente do percurso AC ou BC) as instruções:

CHEGA (A):

```

IF N=0 THEN
    BEGIN
        ENTRA;
        N:=N+1
    END
ELSE ESPERA

```

CHEGA (B):

```

IF N=0 THEN
    BEGIN
        ENTRA;
        N:=N+1
    END
ELSE ESPERA

```

SAI (C):

```

BEGIN
    PASSA POR C;
    N:=N-1
END

```

## 8.6 Generalização dos mecanismos locais de protecção

Os mecanismos apresentados embora garantam a verificação dos predicados de protecção e sejam relativamente simples estão sujeitos a algumas objecções, por exemplo:

a) Num caso como o da figura 8.2 enquanto houver pelo menos um comboio no ramo AC os comboios à espera em B estão impedidos de prosseguir embora por vezes a solução mais razoável fosse, ao fim de um certo tempo, impedir a passagem de mais comboios em A, esperar que  $N_1=0$  e depois permitir o acesso dos comboios a B. Um controle deste tipo pode ser obtido juntando uma nova variável de estado, CONTR que pode tomar os valores "AC" ou "BC" significando respectivamente que o "centro de decisão" resolveu dar prioridade aos comboios

que vão percorrer AC ou BC.

A situação está esquematizada na figura 8.8 e, por exemplo a operação CHEGA(A,AC) fica da seguinte forma:

```
CHEGA(A,AC):
    IF N2=0 AND CONTR=AC THEN
    BEGIN
    ENTRA AC;
    N1:=N1+1
    END
    ELSE ESPERA
```

Em geral CONTR poderá ter como valores conjuntos de percursos permitidos.

b) Porque não substituir um mecanismo de protecção por um sistema de regulação local indicando a cada comboio uma velocidade apropriada? Isso já foi parcialmente implementado e pode justificar-se em zonas de muito tráfego (ver [15] ).

### 8.7 Protecção contra a aproximação excessiva de comboios na mesma via

Quando dois ou mais comboios circulam no mesmo ramo há que incluir mecanismos de protecção para evitar que a distância entre eles seja demasiado pequena: há basicamente dois tipos de protecção possível:

(1) utilizando um controle contínuo da distância entre um comboio e o que vai à sua frente, podendo-se tomar em consideração outras grandezas, no-

meadamente a velocidade de cada comboio (ver [29] )

(2) utilizando uma simulação dos blocos de sinalização que são vulgarmente utilizados.

No programa efectuado está incluído um mecanismo de protecção do tipo (1) baseado apenas na distância entre comboios.

#### 8.8 Sobre o método utilizado

No programa de simulação efectuado as zonas de protecção são caracterizadas por certos pontos aos quais estão associados programas de protecção. Esses programas são interpretados quando um comboio passa por um dos pontos de protecção. Eles estão escritos numa linguagem de protecção descrita no apêndice E que é suficientemente poderosa para poder implementar as instruções CHEGA e SAI referidas atrás bem como outros conjuntos de instruções.

A metodologia geral usada para os esquemas de protecção local foi inspirada em problemas muito semelhantes que aparecem em programas concorrentes e pelas soluções adoptadas nesses casos.

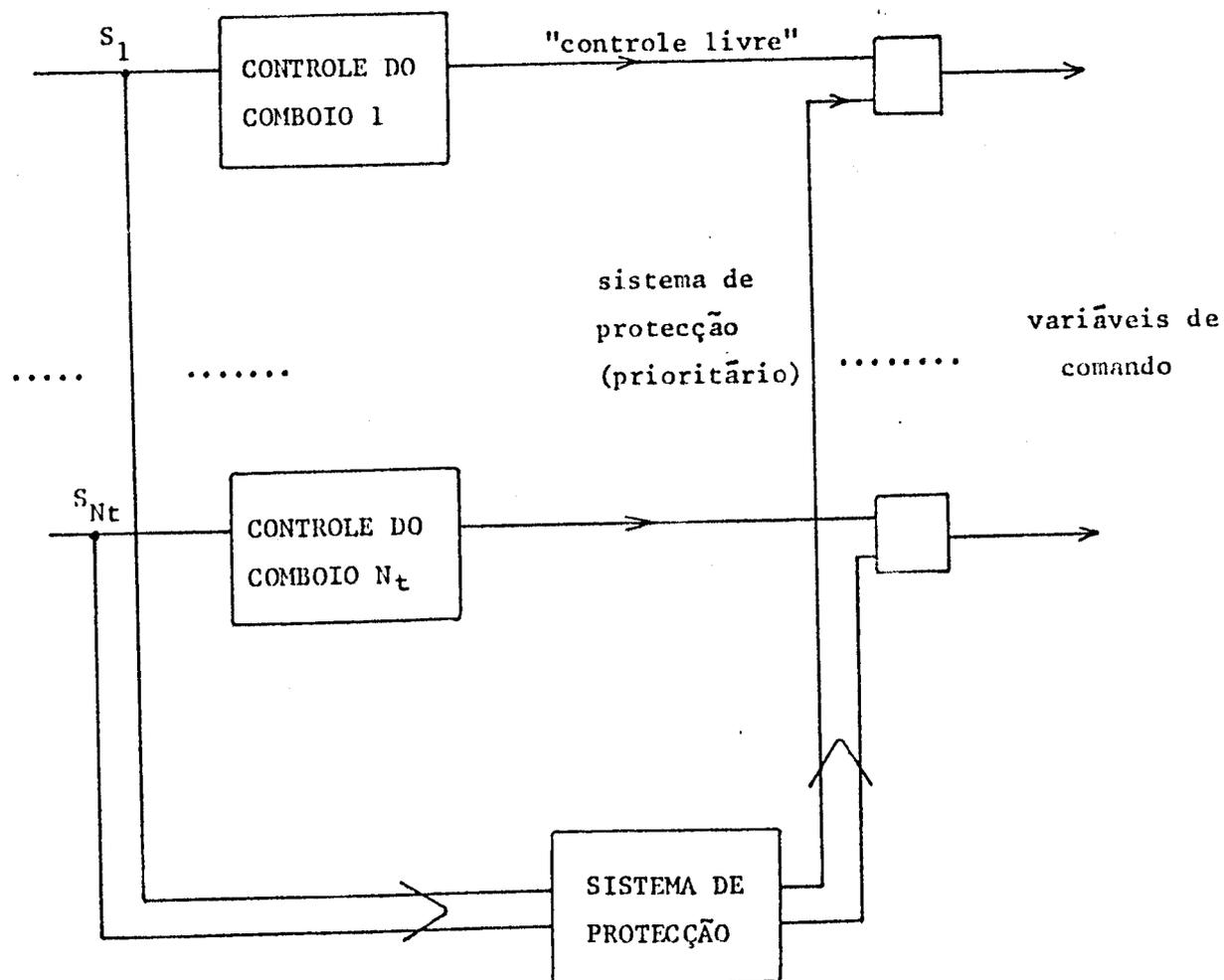


Fig. 8.1 Protecção e Controle.

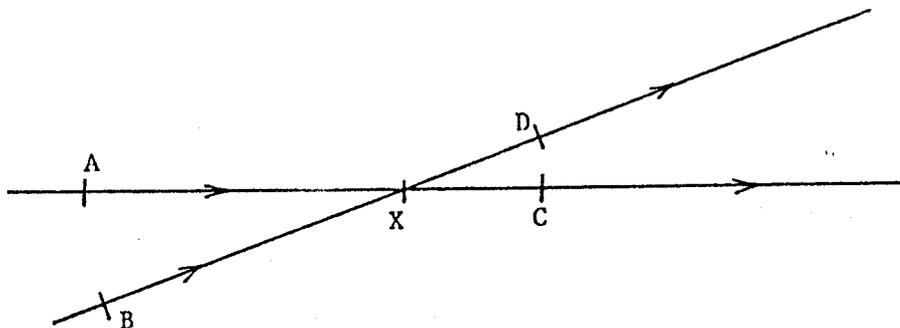


Fig. 8.2 Representação de um cruzamento.

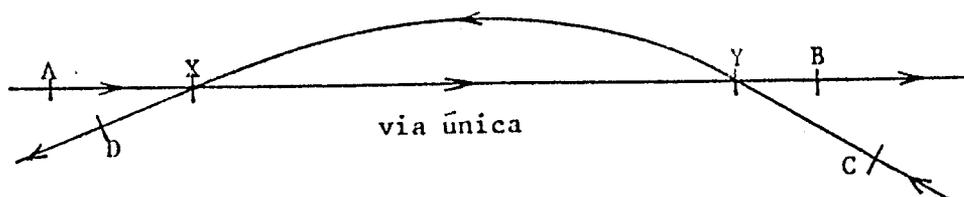


Fig. 8.3 Representação de uma via única (utilizável nos dois sentidos).

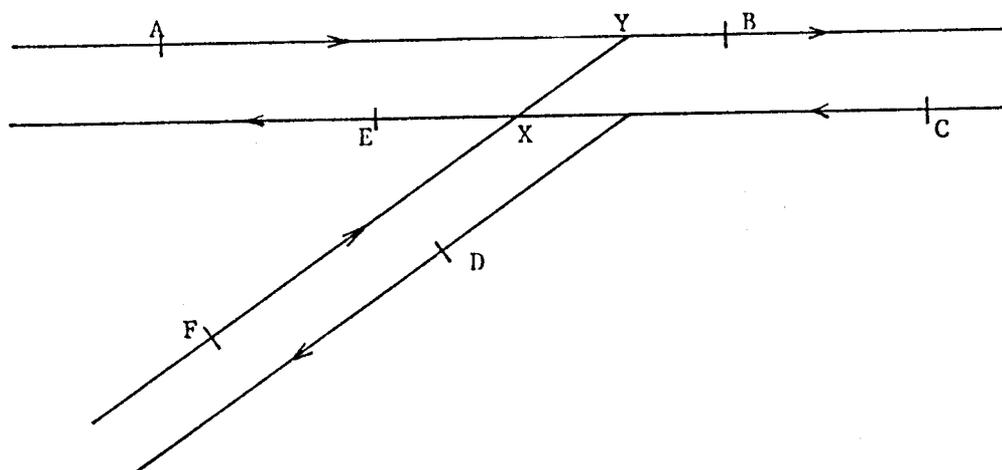


Fig. 8.4 Exemplo de um entroncamento em via dupla.

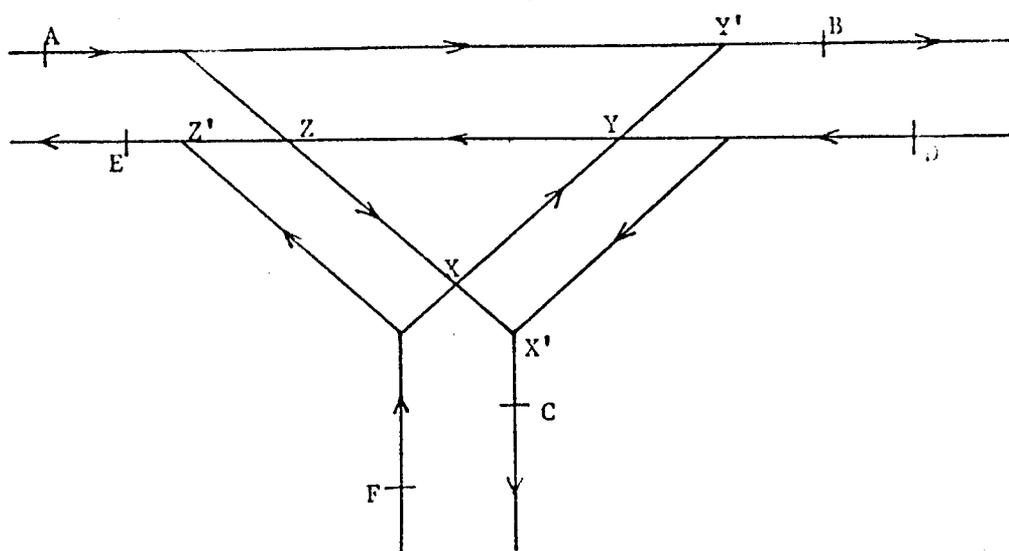


Fig. 8.5 Exemplo de um "triângulo" em via dupla.

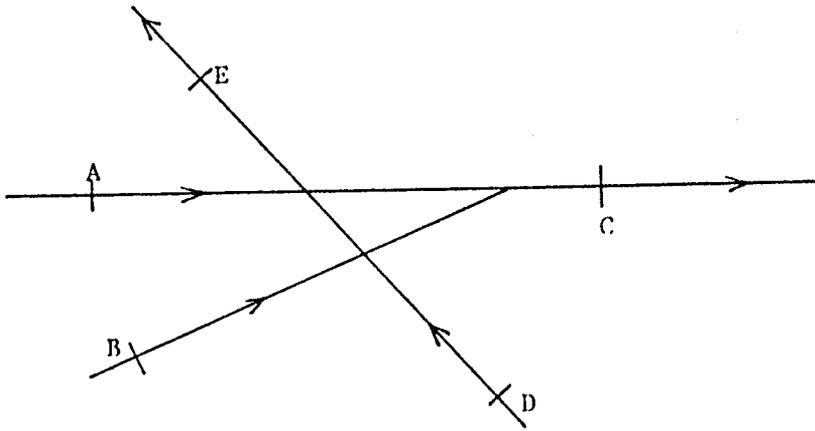


Fig. 8.6 Cruzamento e entroncamento em via única.

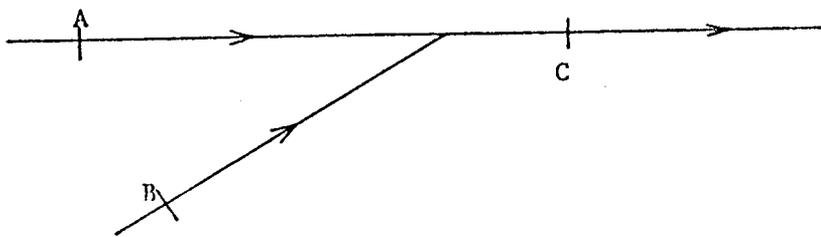


Fig. 8.7 Entroncamento simples.

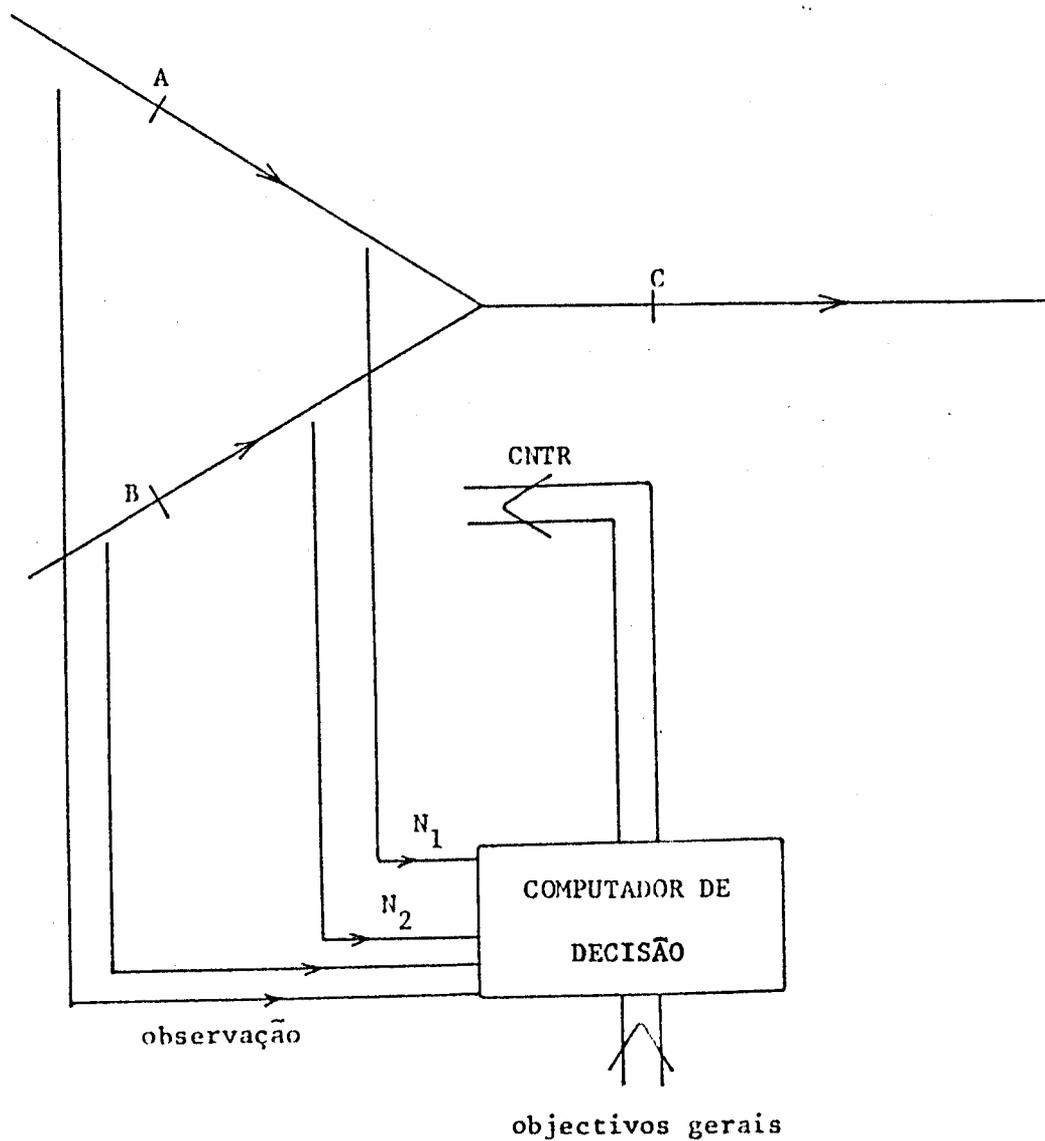


Fig. 8.8 Entroncamento com sistema de observação e algoritmo de prioridades.

CAPÍTULO 9

APLICAÇÕES

## 9. APLICAÇÕES

Neste capítulo começaremos por aplicar o programa de simulação a uma rede de teste relativamente simples mas ilustrativa das potencialidades do programa; serão descritos os dados e os resultados obtidos. Em seguida mencionaremos outras aplicações do programa.

### 9.1 Rede de teste

#### 9.1.1. Descrição da rede

A rede de teste é constituída por 3 ramos com um ponto comum (entroncamento dos ramos 1 e 2). Os comprimentos dos ramos são respectivamente 2km, 3km, 8km (ver figura 9.1).

##### 9.1.1.1. Declives nos ramos

Na figura 9.2 estão representados os declives (por troços) em cada um dos 3 ramos da rede. Estes declives estão expressos em  $m/s^2$  (componentes de  $\vec{g}$  tangencial à linha).

##### 9.1.1.2. Velocidades máximas

Na figura 9.2 estão representadas as velocidades máximas autorizadas nos vários ramos, expressas em km/h. O abrandamento progressivo à aproximação de zonas de baixa velocidade é automaticamente efectuado pelos mecanismos de protecção.

### 9.1.1.3. Rede eléctrica

As características gerais da rede eléctrica estão representadas na figura 9.3 onde estão indicados os números atribuídos aos nós fixos da rede.

### 9.1.1.4. Pontos de protecção

Nos ramos 1 e 2, próximo do seu ponto de confluência estão localizados dois pontos de protecção  $P_1$  e  $P_2$ , simulando semáforos. No ramo 3 existe um outro ponto de protecção  $P_3$ , que define o fim da zona protegida (ver figura 9.4).

### 9.1.1.5. Programa de protecção

Definimos as variáveis:

$N_1$ : número de comboios com o caminho 1 no troço  $P_1-P_3$ .

$N_2$ : número de comboios com o caminho 2 no troço  $P_2-P_3$ .

O predicado de protecção é:  $(N_1=0) \vee (N_2=0)$

O programa para o ponto  $P_1$  é o seguinte (ver apêndice E):

```
BEGIN
  ON PATHS 1
  IF N1=0
  THEN INC(N1); SETGO
  ELSE
  END
```

Para o ponto  $P_2$  o programa é:

```
BEGIN
  ON PATHS 2
  IF N1=0
  THEN INC(N2); SETGO
  ELSE
END;
```

Para o ponto  $P_3$  o programa é:

```
BEGIN
  ON PATHS 1
  IF
  THEN DEC(N1); SETGO
  ELSE
END;
```

```
BEGIN
  ON PATHS 2
  IF
  THEN DEC(N2); SETGO
  ELSE
END
```

#### 9.1.1.6. Parâmetros genéricos da simulação

Estes parâmetros dizem respeito, entre outros, aos seguintes tipos de dados:

- opções de impressão dos resultados
- tempos inicial e final de simulação, de impressão, de discretização

temporal, etc.

— valores limites de algumas variáveis

— critério de convergência

Estes dados são listados no início da execução do programa (ver 1.4) juntamente com uma descrição geral da rede.

### 9.1.2. Horários

Definiram-se dois horários para a rede de teste. Ambos os horários incluem uma paragem aos 4 km do ramo 3 mas, num dos horários (2), o comboio é passivado enquanto que no outro (1) apenas estaciona na linha. O horário 1 é relativo ao caminho 1 e o horário 2 ao caminho 2.

As instruções que compõem os horários são as seguintes:

— Horário 1 (caminho 1)

B0 - PARTIDA NO INSTANTE 0 s

B1 - PASSAGEM AOS 600 m NO INSTANTE 40 s (instrução de regulação contínua)

B2 - \*PASSAGEM AOS 5500 m NO INSTANTE 530 s (mantém a velocidade)

B3 - PARAGEM AOS 6000 m NO INSTANTE 550 s (corresponde aos 4000 m do ramo 3 para este caminho)

B4 - ARRANQUE AOS 600 s

B5 - PASSAGEM AOS 10000 m NO INSTANTE 670 s

B6 - FIM DE PERCURSO

— Horário 2 (caminho 2)

A0 - PARTIDA NO INSTANTE 0 s

A1 - PASSAGEM AOS 3000 m NO INSTANTE 200 s

A2 - PASSIVAÇÃO AOS 7000 m NO INSTANTE 466 s (corresponde aos 4000 m do ramo 3 para este caminho)

A3 - ARRANQUE AOS 500 s SE "GO" (isto é, como não é especificado o programa de protecção, haverá activação e arranque aos 500 s)

A4 - PASSAGEM PELOS 11000 m NO INSTANTE 700 s

A5 - FIM DE PERCURSO

Observação: os tempos e distâncias indicados são relativos ao início do caminho respectivo.

### 9.1.3. Características dos comboios

Na figura 9.5 estão esquematizadas as características dos comboios utilizados; para cada comboio deve ser fornecido:

— um número identificador (NUMERO)

— o tempo em que se inicia a sua simulação (TEMPO) em segundos

— o intervalo de tempo que decorreu entre o início da viagem e o início da simulação (TEMPO ANT. ) em segundos

— o tipo de comboio (TIPO=1 neste caso, significando automotores do tipo U.T.E. - Si)

— o caminho (CAMINHO) e horário (HORARIO)

— a posição, velocidade e aceleração no instante inicial (respectiva-

mente em km, km/h e  $m/s^2$ )

— a massa (toneladas)

— o estado inicial (EST=1 neste caso)

#### 9.1.4. Resultados

9.1.4.1. Descrição geral da rede: pode observar-se na figura 9.6.

9.1.4.2. Alguns exemplos da descrição do estado do sistema: podem observar-se na figura 9.7 onde é ainda possível encontrar mensagens relativas a diversos acontecimentos.

9.1.4.3. Potência fornecida pela subestação; um diagrama da potência fornecida, amostrado de 20 s em 20 s pode observar-se na figura 9.8.

9.1.4.4. Diagramas das trajectórias: na figura 9.9 estão representadas os diagramas reais de circulação dos comboios.

#### Algumas observações relativas ao diagrama da figura 9.9

— Os horários foram estabelecidos de tal forma que não podem ser cumpridos devido, em particular, às limitações de velocidade impostas. Por exemplo, o comboio 20 passa exactamente pelos pontos A1 e A2 fixados pelo horário, estacionando com alguns segundos de atraso (marcado " $\delta$ " na figura 9.9) relativamente ao horário. Depois da partida há um atraso progressivo derivado das limitações de velocidade a 18 km/h e 61.2 km/h acumulando-se no final um atraso  $\delta'$  de cerca de 140 s.

— O comboio 20 (horário 2) é passivado durante a paragem mas o comboio 30 apenas para na estação.

— Os comboios 40 e 50 vêm em dois ramos diferentes (respectivamente

1 e 2) aproximando-se da sua confluência. Como o comboio 50 atinge o ponto de protecção P1 antes do comboio 40 atingir P2, este é obrigado a esperar pela passagem de 50. Deste modo o comboio 50 segue à frente no ramo 3 (ver zona B1 da figura 9.9).

— Na zona marcada B2 os comboios 50, 40 e 60 seguem próximos um dos outros, sendo o movimento de "40" e "60" determinado por uma condição de distância mínima ao comboio precedente; nestas circunstâncias podem observar-se instabilidades nas filas de comboios que se propagam da frente para trás da fila (ver [29]). Estas oscilações dependem em particular do modo de controle do distanciamento entre comboios (distância mínima, blocos de sinalização ou métodos mais elaborados de controle).

— Podem relacionar-se os diagramas das figuras 9.8 e 9.9.

Por exemplo, no instante 1060 s em que há um pico de consumo observável na figura 9.8 pode verificar-se ( figura 9.9) que:

- a) os comboios 30, 50, 70, 80 seguem um movimento a velocidade relativamente constante
- b) os comboios 35, 40, 60 estão em aceleração

## 9.2 Outras aplicações

Limitar-nos-emos a mencionar dois outros casos em que o programa foi utilizado:

- 9.2.1. Aplicação a uma rede de teste com 4 ramos, percorrida por 4 comboios com objectivos semelhantes mas instruções de controle diferentes (de códigos 10, 11, 12 e 13) com finalidade de comparar os métodos de controle quanto à pre-

cisão e às flutuações da grandeza de comando em regime constante.

9.2.2. Aplicação a uma rede real: a linha Rossio-Sintra com cerca de 27 km de extensão e com um entroncamento em Campolide foi simulada com este programa usando horários e tipos de automotoras previstos (U.T.E.-Si) para circulação futura.

O conjunto de dados necessário para esta simulação foi obtido na C.P. e inclui diagramas de perfis e velocidades máximas nas linhas, características da subestação da Amadora e da catenária, diagramas de circulação (horários) dos comboios e características das automotoras U.T.E.-Si (foram também modeladas as automotoras de motores directos presentemente utilizadas). Quando este novo tipo de automotoras entrar em circulação normal (o que se previa que viesse a acontecer bastante antes da terminação deste trabalho) será possível fazer testes mais directos para a validação do programa de simulação, comparando os resultados obtidos com a realidade (em termos, por exemplo, dum registo de potências instantâneas na subestação). Deve contudo dizer-se desde já que os resultados obtidos deverão ser bastante sensíveis às flutuações dos horários e ao modo particular de comando.

Caminho 1 — ramo 1, ramo 3

Caminho 2 — ramo 2, ramo 3

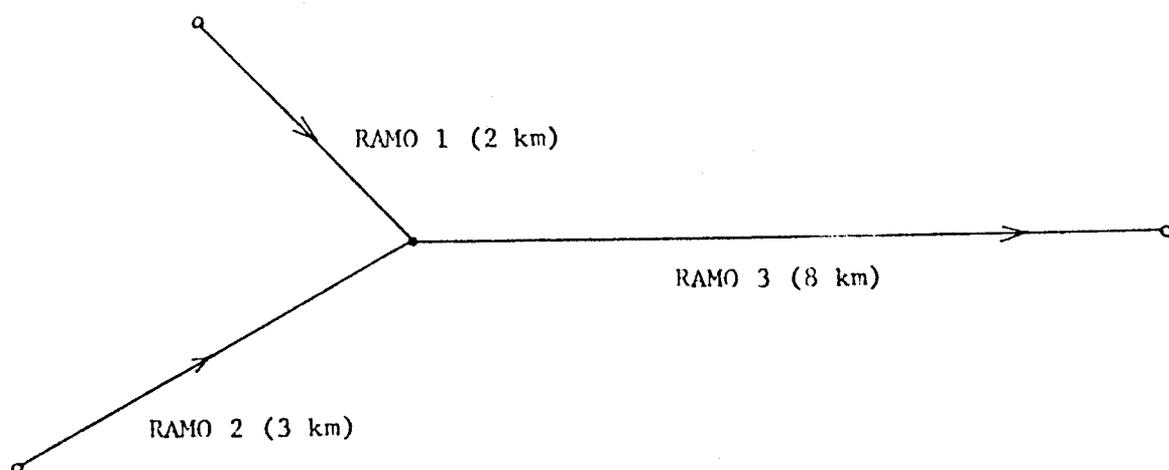


Fig. 9.1 Esquema geral da rede de teste.

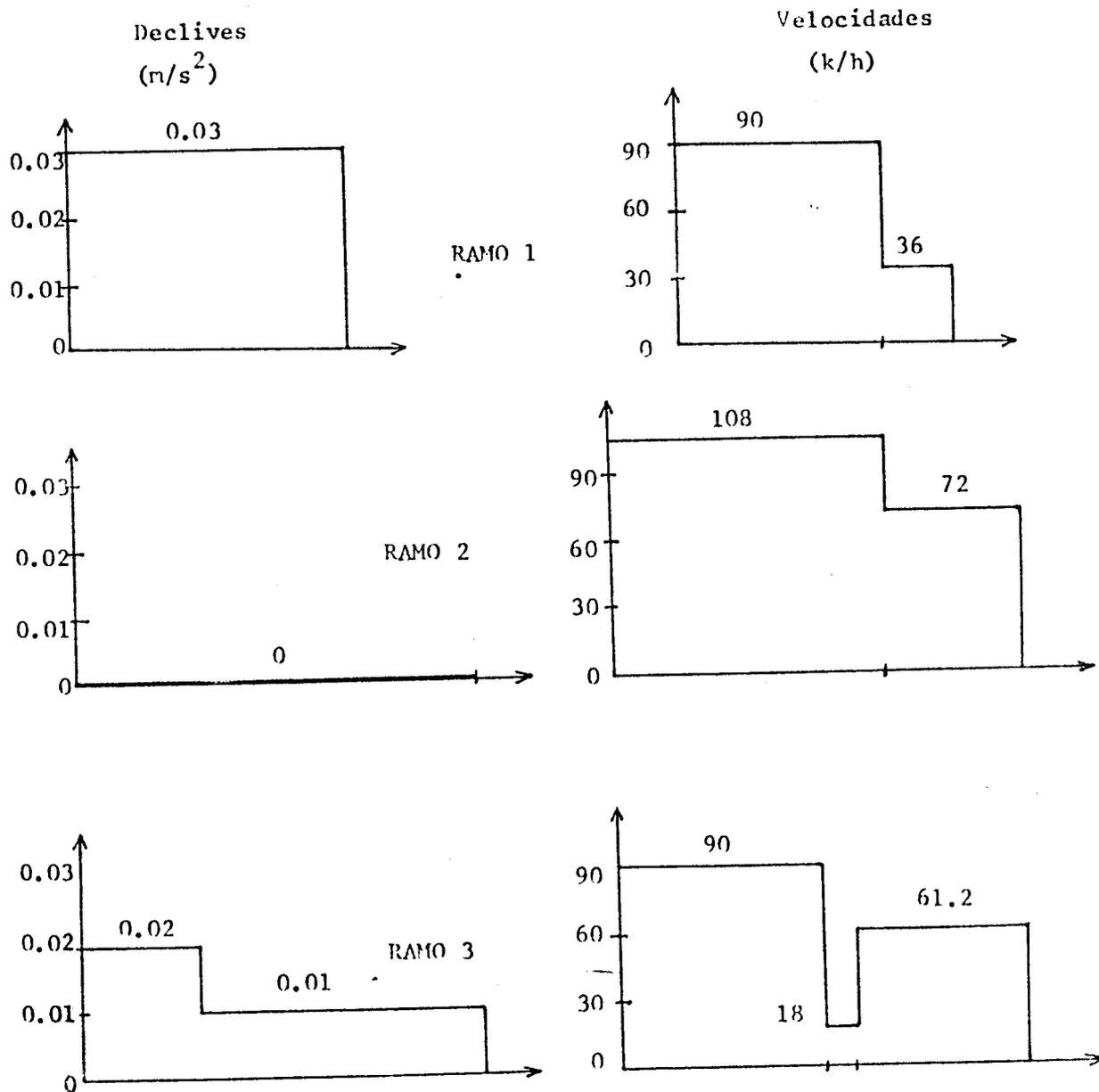


Fig. 9.2 Valores nos ramos dos declives e das velocidades máximas.

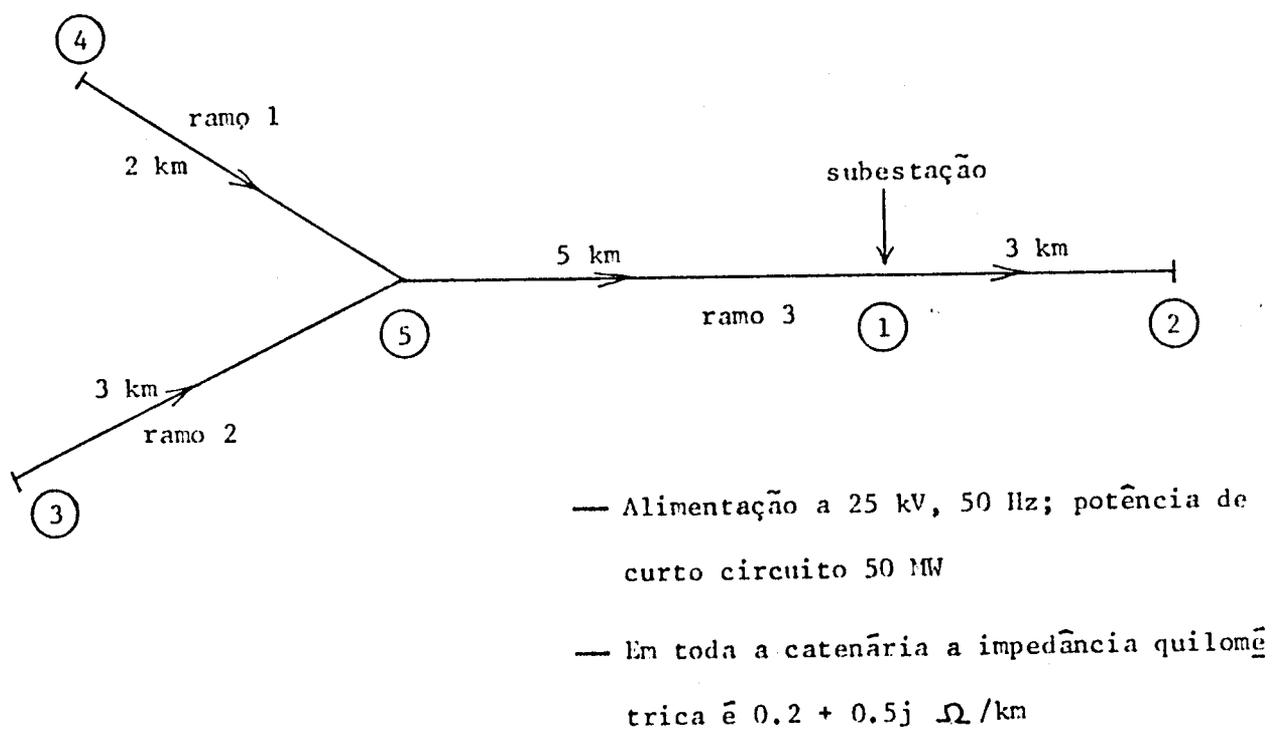


Fig. 9.3 Características da rede elétrica.

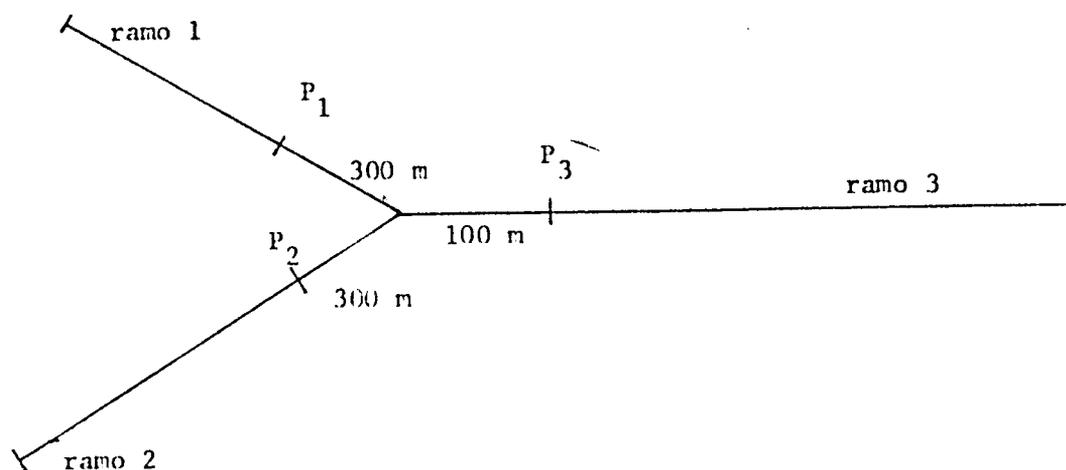


Fig. 9.4 Pontos de protecção na rede.

CARACTERÍSTICAS DOS COMBOIOS QUE ENTRAM NO SISTEMA

1º Cartão			2º Cartão				3º Cartão				
NÚMERO	TEMPO	TEMPO ANT.	TIPO	CAMINHO	HORÁRIO	POS. INIC.	VEL. INIC.	ACEL. INIC.	MASSA	ESTADO	
20	5.0	0.0	1	2	2	0.0	44.0	0.0	175.0	1	
30	200.0	0.0	1	1	1	0.0	35.0	0.0	140.0	1	
35	400.0	0.0	1	2	2	0.0	75.0	0.0	200.0	1	
40	572.0	0.0	1	2	2	0.0	50.0	0.0	150.0	1	
50	600.0	0.0	1	1	1	0.0	50.0	0.0	150.0	1	
60	700.0	0.0	1	2	2	0.0	75.0	0.0	200.0	1	
70	800.0	0.0	1	1	1	0.0	35.0	0.0	140.0	1	
80	900.0	0.0	1	2	2	0.0	44.0	0.0	175.0	1	
-1 *	0.0 *	— *	—	—	—	—	—	—	—	—	

Fig. 9.5 Dados relativos aos comboios que entram na rede de teste.

\* Cartão de terminação

```

*****
*
*          ELECTRICAL TRAIN SIMULATION          *
*
*****

```

```

*****
*
*   MAIN SYSTEM CHARACTERISTICS   *
*   AND PARAMETERS                *
*
*****

```

#### PRINTING FLAGS

```

PRINT HARD EVENT NOTICES
PRINT SOFT EVENT NOTICES
PRINT DATA FOR ENTERING TRAINS
PRINT SYSTEM DATA AT START OF RUN

```

#### SIMULATION TIMING

```

INITIAL TIME OF SIMULATION=      0,0 SEC
FINAL TIME OF SIMULATION=      1200,0 SEC
NOMINAL TIME STEP=             3,0 SEC
PRINTING TIME STEP=            20,0 SEC
MINIMUM TIME STEP FOR STATE INCREMENT=      0,5 SEC
TIME STEP FOR NEXT TRY ON PROTECTION PROGRAMS=      7,0 SEC

```

#### SPEED AND DISPLACEMENT LIMITS

```

MINIMUM SPEED TO BE CONSIDERED MOVING      0,7 KMH
MAXIMUM SPEED (AN UPPER BOUND)=      180,00 KMH/H
MINIMUM HEADWAY DISTANCE=      340,0 M
MINIMUM INCREMENT DISTANCE=      1,0 M
MINIMUM DISTANCE OF DISTINCT ELECTRICAL NODES      10,0 M

```

Fig..9.6 Descrição geral da rede

```

*****
*                                     *
*      RAIL NETWORK DESCRIPTION      *
*                                     *
*****

```

NUMBER OF RAIL EDGES= 3  
 LENGHT OF RAIL EDGE 1 = 2,000 KM  
 LENGHT OF RAIL EDGE 2 = 3,000 KM  
 LENGHT OF RAIL EDGE 3 = 8,000 KM

MAXIMUM NUMBER OF TRAINS ON RAIL EDGE 1 = 9  
 MAXIMUM NUMBER OF TRAINS ON RAIL EDGE 2 = 9  
 MAXIMUM NUMBER OF TRAINS ON RAIL EDGE 3 = 9

#### TRACK GRADIENTS

GRADIENTS ON RAIL EDGE 1  
 FROM 0,000 KM TO 2,000 KM = 0,03000 M/S2  
 GRADIENTS ON RAIL EDGE 2  
 FROM 0,000 KM TO 3,000 KM = 0,00000 M/S2  
 GRADIENTS ON RAIL EDGE 3  
 FROM 0,000 KM TO 2,000 KM = 0,02000 M/S2  
 FROM 2,000 KM TO 8,000 KM = 0,01000 M/S2

#### SPEED LIMITS

SPEED LIMITS ON RAIL EDGE 1  
 FROM 0,000 KM TO 1,500 KM = 90,0000 KM/H  
 FROM 1,500 KM TO 2,000 KM = 36,0000 KM/H  
 SPEED LIMITS ON RAIL EDGE 2  
 FROM 0,000 KM TO 2,000 KM = 108,0000 KM/H  
 FROM 2,000 KM TO 3,000 KM = 72,0000 KM/H  
 SPEED LIMITS ON RAIL EDGE 3  
 FROM 0,000 KM TO 4,000 KM = 90,0000 KM/H  
 FROM 4,000 KM TO 4,500 KM = 18,0000 KM/H  
 FROM 4,500 KM TO 8,000 KM = 61,2000 KM/H

#### PROTECTION POINTS

## PROTECTION PROGRAMS ON RAIL EDGE 1

AT	0.000 KM	CODE OF PROTECTION PROGRAM IS
	GO	
AT	1.700 KM	CODE OF PROTECTION PROGRAM IS
	3	8
	4	9
	5	11
	6	11
	7	1
	8	2
	9	1
	10	1005
	11	10000

## PROTECTION PROGRAMS ON RAIL EDGE 2

AT	0.000 KM	CODE OF PROTECTION PROGRAM IS
	GO	
AT	2.700 KM	CODE OF PROTECTION PROGRAM IS
	12	17
	13	18
	14	20
	15	20
	16	2
	17	1
	18	2
	19	1005
	20	10000

## PROTECTION PROGRAMS ON RAIL EDGE 3

AT	0.000 KM	CODE OF PROTECTION PROGRAM IS
	GO	
AT	0.100 KM	CODE OF PROTECTION PROGRAM IS
	21	26
	22	26
	23	28
	24	28
	25	1
	26	1
	27	1005
	28	33
	29	33
	30	35
	31	35
	32	2
	33	-2
	34	1005
	35	10000

```

*****
*
*   ELECTRICAL NETWORK DATA   *
*
*****

```

```

NUMBER OF FEEDER NODES=      1
TOTAL NUMBER OF FIXED ELECTRICAL NODES=      5
NOMINAL VOLTAGE=      25000.0 V
ADMITTANCE OF STOPPED ELECTRICAL TRAINS= 0,1500E+03 + 0,0000E+00 J MOH
CONVERGENCE CRITERIUM DELTAVR*DELTAVIK      7,00 V

```

### FEEDER CHARACTERISTICS

FEEDER NUMBER 1

```

INTERNAL ADMITTANCE= 0,0000E+00 + -0,8000E-01 J OHM
SHORT CIRCUIT CURRENT= 0,0000E+00 + -0,2000E+04 J A

```

### NETWORK LINES

OVERHEAD LINES OF RAIL EDGE 1

```

AT      0,000 KM IS NODE NUMBER      4
FROM    0,000 KM TO      2,000 KM
KILOMETRIC IMPEDANCE IS 0,2000E+00 + 0,5000E+00 J OHM
AT      2,000 KM IS NODE NUMBER      5

```

OVERHEAD LINES OF RAIL EDGE 2

```

AT      0,000 KM IS NODE NUMBER      3
FROM    0,000 KM TO      3,000 KM
KILOMETRIC IMPEDANCE IS 0,2000E+00 + 0,5000E+00 J OHM
AT      3,000 KM IS NODE NUMBER      5

```

OVERHEAD LINES OF RAIL EDGE 3

```

AT      0,000 KM IS NODE NUMBER      5
FROM    0,000 KM TO      5,000 KM
KILOMETRIC IMPEDANCE IS 0,2000E+00 + 0,5000E+00 J OHM
AT      5,000 KM IS NODE NUMBER      1
FROM    5,000 KM TO      8,000 KM
KILOMETRIC IMPEDANCE IS 0,2000E+00 + 0,5000E+00 J OHM
AT      8,000 KM IS NODE NUMBER      2

```

```

*****
*
*   CODE OF TIMETABLE PROGRAMS   *
*
*****

```

PATH OF TIMETABLE 1 IS 1

CODE FOR TIMETABLE 1 IS

FIELD1	CODE	FIELD2
600,00	10	40,00
5500,00	13	530,00
6000,00	3	550,00
0,00	6	600,00
10000,00	10	670,00
0,00	5	0,00

PATH OF TIMETABLE 2 IS 2

CODE FOR TIMETABLE 2 IS

FIELD1	CODE	FIELD2
3000,00	10	200,00
7000,00	4	466,00
1,10	7	500,00
11000,00	10	700,00
0,00	5	0,00

#### PATH DESCRIPTION

PATH NUMBER 1

EDGE= 1

EDGE= 3

PATH NUMBER 2

EDGE= 2

EDGE= 3

\*\*\*END OF DATA DESCRIPTION\*\*\*\*

\*\*\*\*\*STATE DESCRIPTION\*\*\*\*\*  
 SYSTEM TIME= 480,0 SEC.

STATE OF FIXED ELECTRICAL NODES

NUMBER	VMOD	VARG	APOWER	RPOWER
1	24696,7	-0,02223	1098,121	587,009
2	24696,7	-0,02223		
3	24601,4	-0,02536		
4	24620,3	-0,02478		
5	24620,3	-0,02478		

STATE OF TRAINS IN SYSTEM

NUM	LOC	X(KM)	S(KM/H)	ST	MODE	P(KW)	VMOD(V)	ARG(RO)	CURR(A)
35	2	1,185	54,45	1	3	512,4	24601,4	-0,025	24,154
30	3	1,018	36,00	1	3	273,2	24630,6	-0,024	12,242
20	3	3,999	7,58	1	3	310,8	24675,0	-0,023	14,067

POWER IN TR POWER P, LOSS ENERGY IN ENG. LOSS  
 (KW) (KW) (KW) (KWH) (KWH)

1098,12 1096,49 1,63 115,405 0,274

\*\*\*\*\*#\*\*\*\*\*

AT TIME 481,37 TRAIN N. 20 STOPS AND IS PASSIVATED

Fig. 9.7 Exemplos de descrições do estado do sistema

\*\*\*\*\*STATE DESCRIPTION\*\*\*\*\*  
 SYSTEM TIME= 560,0 SEC.

STATE OF FIXED ELECTRICAL NODES

NUMBER	VMOD	VARG	APOWER	RPOWER
1	24777,5	-0,01704	888,982	433,131
2	24777,5	-0,01704		
3	24703,6	-0,02040		
4	24710,0	-0,02020		
5	24710,0	-0,02020		

STATE OF TRAINS IN SYSTEM

NUM	LOC	X(KM)	S(KM/H)	ST	MODE	P(KW)	VMOD(V)	ARG(RP)	CURR(A)
35	2	2,395	54,45	1	3	515,0	24703,6	-0,020	24,169
30	3	1,818	36,00	1	3	274,7	24728,5	-0,020	12,257
20	3	4,167	17,61	1	1	98,1	24764,1	-0,018	3,962

POWER IN TR POWER P. LOSS ENERGY IN ENG, LOSS  
 (KW) (KW) (KW) (KWH) (KWH)

888,98 887,81 1,17 136,572 0,304

\*\*\*\*\*

CHARACTERISTICS OF TRAIN 40

TYPE= 1 MASS= 150,00 TON  
 RAIL EDGE= 2 LOCATION= 0,000KM SPEED= 50,0KMH  
 ACCELERATION= 0,00MS2 PATH= 2 TIMETABLE= 2

AT TIME 572,00 TRAIN N, 40 ENTERS THE NETWORK  
 TRAIN N, 20 VIOLATES A SPEED LIMIT CONSTRAINT

\*\*\*\*\*STATE DESCRIPTION\*\*\*\*\*  
 SYSTEM TIME= 720,0 SEC.

STATE OF FIXED ELECTRICAL NODES

NUMBER	VMOD	VARG	APOWER	RPOWER
1	24482,1	=0,03900	1909,341	977,144
2	24481,4	=0,03907		
3	24340,8	=0,04403		
4	24347,9	=0,04367		
5	24351,0	=0,04355		

STATE OF TRAINS IN SYSTEM

NUM	LOC	X(KM)	S(KM/H)	ST	MODE	P(KW)	VMOD(V)	ARG(RD)	CURR(A)
50	1	1,407	36,00	1	3	285,6	24347,9	=0,044	13,029
60	2	0,310	42,30	1	1	94,8	24340,8	=0,044	3,852
40	2	2,218	54,11	1	3	499,2	24342,3	=0,044	23,772
35	3	1,952	58,69	1	3	672,4	24382,0	=0,042	32,472
30	3	3,418	36,00	1	3	256,8	24426,6	=0,041	11,551
20	3	5,903	58,51	1	1	95,9	24481,4	=0,039	3,917

POWER IN (KW)	TR POWER (KW)	P, LOSS (KW)	ENERGY IN (KWH)	ENG, LOSS (KWH)
1909,34	1904,75	4,59	237,108	0,578

\*\*\*\*\*

TRAIN N. 50 VIOLATES A SPEED LIMIT CONSTRAINT

\*\*\*\*\*STATE DESCRIPTION\*\*\*\*\*  
 SYSTEM TIME= 1060,0 SEC.

## STATE OF FIXED ELECTRICAL NODES

NUMBER	VMOD	VARG	APOWER	RPOWER
1	22599,8	-0,13201	5949,278	3946,315
2	22565,9	-0,13305		
3	22300,3	-0,14145		
4	22306,5	-0,14124		
5	22306,5	-0,14124		

## STATE OF TRAINS IN SYSTEM

NUM	LOC	X(KM)	S(KM/H)	ST	ND	P(KW)	VMOD(V)	ARG(RD)	CURR(A)
80	2	2,395	54,41	1	3	455,5	22300,3	-0,141	23,792
70	3	0,818	56,00	1	3	239,3	22314,8	-0,141	11,909
60	3	1,901	66,50	1	6	1613,6	22330,9	-0,140	87,719
40	3	2,330	34,03	1	3	1210,6	22354,4	-0,140	65,372
50	3	2,795	36,00	1	3	229,0	22393,2	-0,138	11,302
35	3	4,613	35,12	1	3	1262,7	22553,4	-0,133	67,625
30	3	6,590	58,27	1	3	912,6	22565,9	-0,133	49,440

POWER IN (KW)	TR POWER (KW)	P. LOSS (KW)	ENERGY IN (KWH)	ENG. LOSS (KWH)
5949,28	5923,35	25,93	531,149	1,771

\*\*\*\*\*

TRAIN N. 60 VIOLATES A HEADWAY CONSTRAINT  
 TRAIN N. 60 VIOLATES A HEADWAY CONSTRAINT

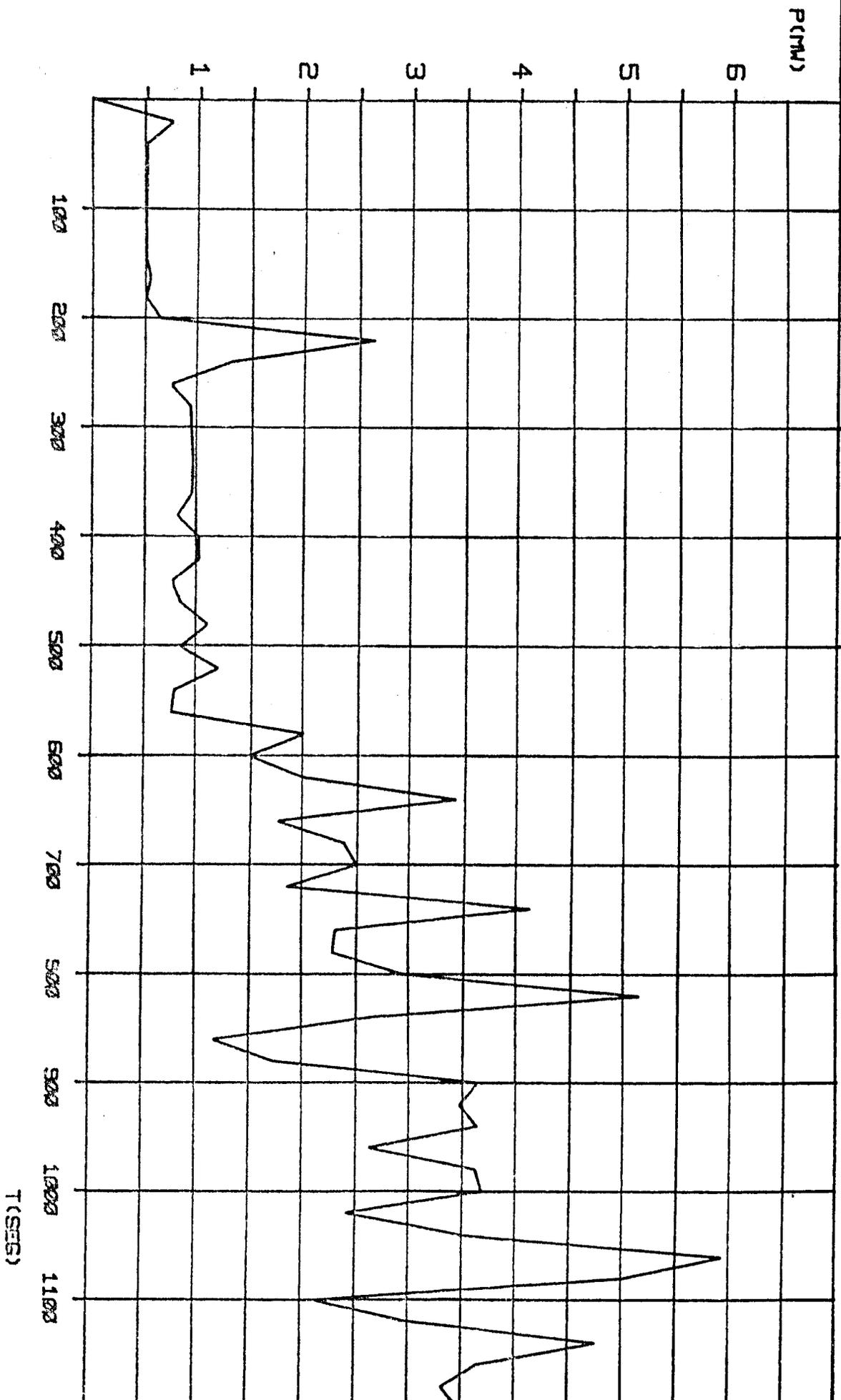


FIGURA 9.8

DIAGRAMA DE CARGAS DA SUBESTAÇÃO



CAPÍTULO 10

O PROBLEMA DA OPTIMIZAÇÃO DO MOVIMENTO

## 10. O PROBLEMA DA OPTIMIZAÇÃO DO MOVIMENTO

### 10.1 Introdução

Os estudos de optimização da exploração de redes de caminhos de ferro electrificadas envolvem muitos aspectos complexos, desde o planeamento de horários ao controle dos comboios e à manutenção do material. Neste trabalho limitar-nos-emos a fazer algumas considerações sobre um desses problemas que consiste na optimização do movimento dos comboios. Nesta introdução não podemos deixar de sublinhar os seguintes aspectos gerais:

— Qualquer modelo utilizado para uma optimização é estabelecido utilizando um certo número de simplificações com vista a permitir um ataque do problema com probabilidades de sucesso. Estas simplificações (que envolvem por exemplo restrições no domínio modelado e aproximações nas leis físicas) têm consequências óbvias na "qualidade" do resultado final, obtendo-se soluções mais ou menos afastadas do verdadeiro óptimo (soluções subóptimas, diz-se com certo optimismo). Parece-nos que, de uma forma geral, apenas um método "realimentado" pela realidade de construir os modelos, poderão, ao fim de algumas iterações fornecer resultados relativamente próximos de óptimo.

— Como um caso particular de que se disse atrás, o problema da fixação da função a optimizar e das restrições impostas é muito difícil de estabelecer em função da realidade, ficando muitas vezes a sua especificação dependente de critérios menos científicos.

Em face do que acabamos de dizer é geralmente necessário analisar de

forma crítica os resultados de optimizações, distinguindo o "óptimo" do sistema modelado do "óptimo" do sistema real.

## 10.2 Formulação do problema

Podemos formular o problema da optimização do consumo de energia como um caso clássico de controle óptimo:

— Seja  $X(t)$  o vector estado de um sistema de  $N_t$  comboios:

$$X(t) = [x_1(t), v_1(t), \dots, x_{N_t}(t), v_{N_t}(t)]^T$$

As equações dinâmicas podem ser representadas por

$$(1) \dot{X}(t) = f(X(t), U(t))$$

onde  $U(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_{N_t}(t)]^T$  é o vector de comando dos comboios.

As equações da rede eléctrica e as características dos comboios permitem determinar as tensões e correntes nas subestações alimentadoras a partir do estado (posição e velocidade) dos comboios e das grandezas de comando:

$$(2) E_i(t) = g_i(X(t), U(t)) \quad 1 \leq i \leq N_{FEED}$$

$$I_i(t) = h_i(X(t), U(t))$$

Então o problema de optimização da energia (activa) consumida pode ser posto nos seguintes termos:

determinar o vector de controle  $U(t)$ ,  $t \in [t_0, t_f]$  que minimiza o integral:

$$(3) J = \int_{t_0}^{t_f} L(X(t), U(t)) dt$$

com:

$$L(X(t), U(t)) = \sum_{i=1}^{NFEED} \operatorname{Re} (E_i(t) I_i^*(t))$$

de forma a que sejam satisfeitos os seguintes tipos de restrições:

- a) instantes de arranque e paragem, pontos de passagem fixados, condições nos extremos ( $t_0$  e  $t_f$ );
- b) condições derivadas da distância mínima entre comboios;
- c) condições derivadas das zonas protegidas (entroncamentos, etc.);
- d) limitações no vector de estado (velocidades máximas);
- e) limitações no vector de controle.

Temos pois uma formulação de um problema clássico de controle ótimo de um sistema invariante no tempo (as funções  $f$  e  $L$  não dependem explicitamente do tempo).

Pode observar-se que, com esta formulação, foi transferida grande parte da complexidade do problema para a especificação das restrições impostas. Alternativamente, as condições b), c), d) e e) poderiam ser incluídas na função de custo  $L(X, U)$  atribuindo-lhe um valor muito elevado nas zonas proibidas do hiperespaço  $X, U$ .

Consideremos agora, temporareamente, o sub-problema simples de um comboio isolado, controlado entre  $t_0$  e  $t_f$ , em que se impõem as seguintes restrições:

$$x(t_0) = x_0 \quad v(t_0) = v_0$$

$$x(t_f) = x_f \quad v(t_f) = 0$$

Observando a figura 10.1, em que se admite que na travagem não há consumo nem recuperação de energia, concluímos que se "I" é uma trajectória óptima então "II" também o é, desde que:

$$\int_{t_1}^{t_f} v_I(t) dt = \int_{t_1}^{t_f} v_{II}(t) dt.$$

Somos pois levados a concluir que não existe em geral, solução óptima única (ou por outras palavras a hiper-superfície representativa do custo como função de  $U(t)$  tem "patamares").

Considerando ainda o mesmo caso, pode pensar-se ser razoável permitir atraso na chegada a  $x_f$ , se isso se traduzir numa economia importante de energia. Isto leva-nos a substituir o problema dado pelo seguinte:

— procurar  $U(t)$  entre  $t_0$  (valor fixado) e  $t_f$  (valor livre) tal que  $x(t_0) = x_0$ ,  $v(t_0) = v_0$ ,  $x(t_f) = x_f$ ,  $v(t_f) = 0$  e que seja mínimo o integral:

$$J' = \int_{t_0}^{t_f} (l(x,u) + K) dt.$$

A constante  $K$  traduz o "peso" atribuído ao tempo da viagem de  $x_0$  a  $x_f$ . Pelo "princípio da optimalidade", se para um certo  $K$ ,  $x(t)$  e  $u(t)$  são uma solução óptima para este problema correspondente a um certo  $t_f$ , então são também uma solução óptima para o problema anterior com o mesmo valor  $t_f$  fixado.

Na figura 10.2 está representado o comportamento típico dos custos óptimos como função de  $K$ .

Em conclusão, pode dizer-se que a fixação de certas condições (como o valor  $t_f$  no caso anterior) pode afastar os resultados obtidos do "ótimo global".

### 10.3 Métodos de ataque ao problema da otimização dos consumos

#### 10.3.1 Considerações gerais

Para uma rede com alguma complexidade a solução do problema de optimização global parece estar fora do alcance dos métodos e capacidades computacionais actuais. Apesar disso, para determinados subproblemas, a optimização pode fornecer soluções úteis (embora não globalmente óptimas) para o controle do movimento. Os tipos de subproblemas podem agrupar-se segundo várias classificações, por exemplo:

- aplicação a um ou vários comboios
- independência ou dependência do controle dos vários comboios
- custo a minimizar expresso em termos de energia consumida ou em termos dos atrasos (ou dos dois)
- tipos de restrições modelados
- controle ótimo determinado "off-line" por métodos determinísticos ou controle em tempo geral.

Nos parágrafos seguintes vamos considerar alguns subproblemas particu-

lares, fazendo observações gerais relativas à sua solução.

### 10.3.2 Um sô comboio em movimento livre

O estado do sistema tem duas componentes apenas: posição  $x$  e velocidade  $v$  do comboio. As restrições relativas aos limites de velocidade podem englobar-se na função de custo  $L(x,v,u)$ , adicionando-lhe penalizações apropriadas. Trata-se pois de um problema clássico de controle ótimo, para o qual há duas classes de métodos distintos (embora relacionados) de solução:

- métodos baseados na Programação Dinâmica ( [18] )
- métodos baseados no Princípio de Máximo de Pontryagin ( [19],[20] ).

Não iremos descrever estes métodos mas apenas fazer alguns comentários comparativos.

Ambos os métodos necessitam de uma discretização temporal das equações do sistema para poderem ser numericamente aplicados, o que envolve uma primeira aproximação.

Os métodos baseados na Programação Dinâmica são de aplicação mais geral, implicando todavia (na maioria dos casos) custos computacionais mais elevados (nomeadamente em memória utilizada). Algumas técnicas (em especial a Programação Dinâmica por Incremento de Estado) permitem reduzir bastante o "espaço de pesquisa" tornando a sua aplicação algo mais convidativa.

Os métodos numéricos baseados no Princípio do Máximo são geralmente iterativos, permitindo obter trajectórias sucessivas que se aproximam (eventualmente) da trajectória ótima. Embora envolvam também bastante esforço computacional, gastam geralmente menos memória que os métodos baseados na Programação Dinâmica. Todavia podem não fornecer uma solução ótima mas ape-

nas uma solução estacionária ou podem até não convergir. Em [21] descrevem-se os principais métodos deste tipo.

Observações: no caso que estamos a considerar (um comboio apenas) pode ser conveniente a utilização de "x" como variável independente, reduzindo de 2 para 1 o número de equações do sistema:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{variável independente } t & & \text{variável independente } x \\
 \left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = v \\ \dot{v} = f_1(x, v, u) \end{array} \right. & \longrightarrow & \frac{dv}{dx} = \frac{1}{v} f_1(x, v, u) \\
 \\
 J = \int_{t_0}^{t_f} L(x, v, u) dt & \longrightarrow & J = \int_{x_0}^{x_f} \frac{1}{v} L(x, v, u) dx
 \end{array}$$

Porém, note-se que o novo modelo não é invariante (em x, a nova variável independente) e que é necessário impôr a nova condição:

$$t_f - t_0 = \int_{t_0}^{t_f} dt = \int_{x_0}^{x_f} \frac{1}{v} dx$$

o que pode ser feito em termos de uma penalização apropriada em J; as restrições de velocidade

$$0 \leq v \leq v(x)$$

são expressas em termos da variável independente.

### 10.3.3 Uma simplificação do caso anterior (um sô comboio em movimento livre)

Admitamos que a velocidade é aproximadamente conhecida para

$x = x_0, x_1, \dots, x_f$ , valendo  $v_0, v_1, \dots, v_f$  e que nos intervalos  $[x_0, x_1]$ ,  $[x_1, x_2]$ ,  $\dots$ ,  $[x_{n-1}, x_f]$  o movimento é "livre" (em particular  $x_0, x_1, \dots, x_f$  podem representar pontos de paragem).

Se conhecermos o custo óptimo em energia para percorrer  $[x_i, x_{i+1}]$  como função do tempo gasto  $\Delta t_i$  (ver figura 10.2):

$$C_i(\Delta t_i),$$

o problema pode resumir-se a:

$$\text{minimizar } \sum_{0 \leq i < n} C_i(\Delta t_i), \text{ sujeito a } \sum_{0 \leq i < n} \Delta t_i = t_f - t_i$$

tratando-se pois de um problema de programação matemática (de dimensões finitas) não linear (mas possivelmente convexo).

Os custos  $C_i(\Delta t_i)$  podem determinar-se de vários modos usando os métodos de 9.2 para cada intervalo  $[x_i, x_{i+1}]$  ou, de uma forma experimental (passando  $C_i(\Delta t_i)$  a representar custos reais e não custos óptimos), ou ainda utilizando funções de controle particulares.

Os pontos  $x_i$  devem ser escolhidos por forma a que a hipótese posta relativa à velocidade seja aproximadamente válida (por exemplo pontos em zonas de baixa velocidade máxima e pontos de paragem).

Foi realizada uma optimização simples deste tipo utilizando o método de Programação Dinâmica para optimizar o consumo na viagem Rossio-Amadora (com base em funções  $C_i(\Delta t_i)$  obtidas de [26]).

São possíveis outras variantes dentro deste tipo de simplificações.

#### 10.3.4 Movimento livre de vários comboios numa rede eléctrica

Analisemos a situação de vários comboios em movimento numa rede, admitindo que não se verificam restrições do tipo interactivo (entre comboios distintos), nomeadamente limitações devidas à distância mínima entre comboios ou a zonas de protecção. Se o movimento de cada comboio fosse independente dos restantes, ele poderia ser optimizado isoladamente (como se referiu em 10.3.2) de uma forma relativamente simples. Todavia existe uma certa interacção entre o movimento dos vários comboios devida à rede eléctrica de alimentação (esta interacção existe apenas entre os comboios eléctricos).

A optimização por qualquer dos métodos referidos em 10.3.2 aplicada ao caso que estamos a considerar (com  $2N_t$  variáveis de estado) conduz a um esforço computacional excessivo (por exemplo, na Programação Dinâmica, o número de estados discretos a considerar cresce exponencialmente com o número de variáveis de estado). É contudo possível (se a interacção entre os comboios for relativamente pequena) "trocar" a interacção por um método iterativo. Neste método os movimentos dos comboios são optimizados de forma independente e iterativa, segundo o seguinte esquema:

1) Admitir para cada comboio  $i$ ,  $1 \leq i \leq N_t$  uma trajectória  $(x_i(t), v_i(t))$  nominal e um comando  $u_i(t)$  tão próximos quanto possível dos valores óptimos.

2) Para  $i = 1, 2, \dots, N_t$  resolver o seguinte problema de optimização por qualquer dos métodos referidos em 10.3.2:

— admitir que todos os comboios  $j \neq i$  têm as suas trajectórias actuais fixadas, e determinar a trajectória do comboio  $i$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = f_i(x_i(t), v_i(t), u_i(t), t) \end{cases}$$

por forma a minimizar o integral

$$J = \int_{t_0}^{t_f} L(x_i(t), v_i(t), t) dt \quad \text{com } L \text{ definido em (3).}$$

Esta trajectória "sub-ótima" passa a ser a trajectória actual do comboio  $i$ .

Note-se que a fixação das trajectórias dos outros comboios equivale a substituir em  $f_i$  e em  $L$  as variáveis de estado  $x_j(t)$ ,  $v_j(t)$  ( $j \neq i$ ) por funções conhecidas do tempo.

3) Repetir o passo 2) até que nenhuma das trajectórias óptimas calculadas difira da anterior de mais que um certo valor pré-fixado.

Este processo a que chamamos "decomposição iterativa" substitui um problema de optimização de um sistema invariante no tempo com  $2N_t$  variáveis de estado pela resolução iterativa de  $N_t$  problemas de optimização de sistemas variantes no tempo com 2 variáveis de estado, o que significa em geral uma redução substancial na complexidade dos cálculos.

### 10.3.5 Movimento de vários comboios com restrições

Poderíamos pensar em aplicar o método de decomposição iterativa ao caso de haver outro tipo de interacções, nomeadamente com a fixação de uma distância mínima entre comboios. Contudo o seguinte exemplo mostra que o método pode convergir para uma solução não óptima:

— consideremos os comboios 1 e 2 cujo movimento se pretende determinar de modo a minimizar um certo custo  $J$  (envolvendo também os atrasos de chegada). Na figura 10.3 a) está esquematizada uma possível solução ótima. Se admitirmos que a sequência 1, 2 é sempre usada no passo 2) do método definido em 10.3.4 (optimização do movimento 1, seguida da optimização do movimento de 2 sujeita às restrições de distância) poderemos obter uma convergência para uma solução esquematizada na figura 10.3 b),

Situações como esta em que o método não converge para a solução ótima parecem ser devidas ao facto da interacção entre os comboios não ser suficientemente suave. É necessário um estudo mais aprofundado da convergência neste tipo de métodos.

#### 10.4 Optimização dos atrasos

Abandonando a procura do ótimo global, podemos procurar soluções sub-ótimas correspondentes a uma partição dos problemas de optimização em dois níveis hierárquicos conforme se esquematiza na figura 10.4.

O primeiro nível corresponde a uma optimização dos tempos de atraso, de travessia de zonas protegidas, etc. Este nível utiliza informações heurísticas relativas à capacidade (velocidade, aceleração) das várias composições e eventualmente aos seus consumos, produzindo uma série de objectivos a serem cumpridos pelas várias composições (em termos de velocidade instantânea, tempos de passagem, etc.). Esta "optimização" pode aplicar-se a zonas mais ou menos extensas, e pode ser constituída por vários níveis hierárquicos internos.

Os algoritmos de optimização respectivos são relativamente ineficientes (levando normalmente a problemas do tipo NP-completo) sendo baseados numa enumeração mais ou menos exaustiva das hipóteses de sequenciamento nas zonas protegidas (utilizando métodos da Programação Inteira, ver um caso concreto em [15]).

Em alternativa podem utilizar-se algoritmos heurísticos de sequenciamento que, embora não sendo óptimos, são de execução muito mais rápida ([30]).

O segundo nível de optimização recebe as instruções (objectivos) do primeiro nível, determinando um controle dos comboios que permita a satisfação dessas instruções de uma forma óptima (relativamente a um custo dependente, entre outros factores, do consumo de energia). Os métodos de solução para este segundo nível foram indicados no parágrafo 10.3; poderemos acrescentar os algoritmos de controle em tempo real ([23]).

Observemos que toda a descrição feita é naturalmente adaptável ao controle em tempo real, no qual se faz uma observação actualizada (para cada nível de optimização) do estado do sistema e se utiliza um algoritmo de regulação do movimento dos comboios por forma a satisfazer os objectivos fixados de forma óptima ou sub-óptima. O controle óptimo em tempo real terá provavelmente de ser utilizado nos caminhos de ferro devido às inevitáveis flutuações aleatórias do movimento dos comboios relativamente aos horários pré-fixados.

A consideração de uma rede genérica com diversas zonas de protecção e vários comboios em circulação leva a problemas de optimização que excedem de uma forma geral a capacidade computacional actual. Uma das causas de complexidade do problema reside no facto de poder haver numerosos extremos locais de  $J$  relativamente afastados, correspondentes às várias hipóteses de sequenciamento dos comboios em zonas protegidas.

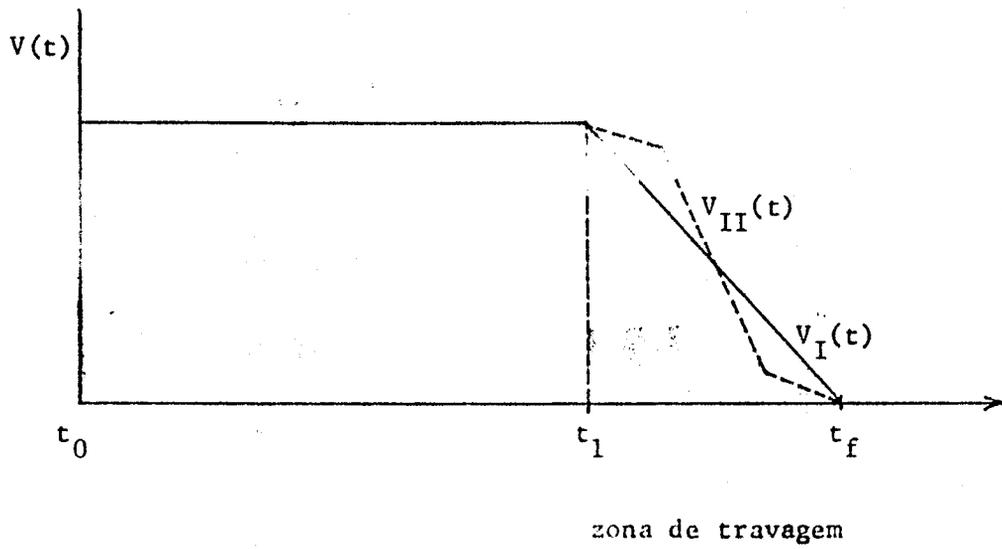


Fig. 10.1 Duas trajectórias óptimas (mesma área debaixo das duas curvas).

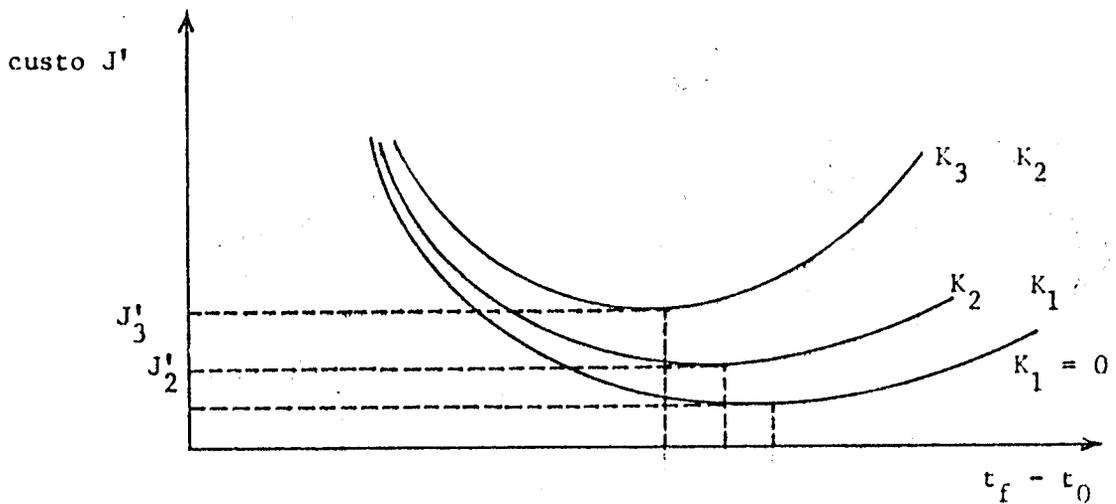
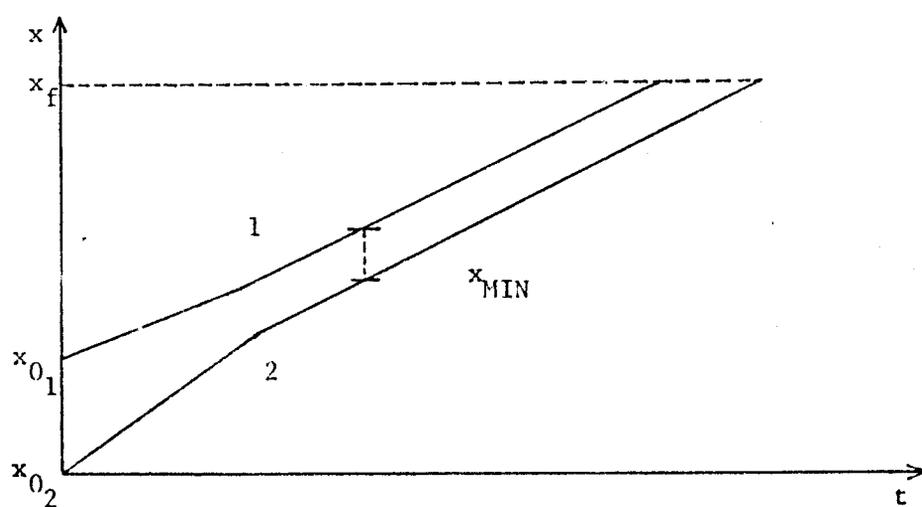
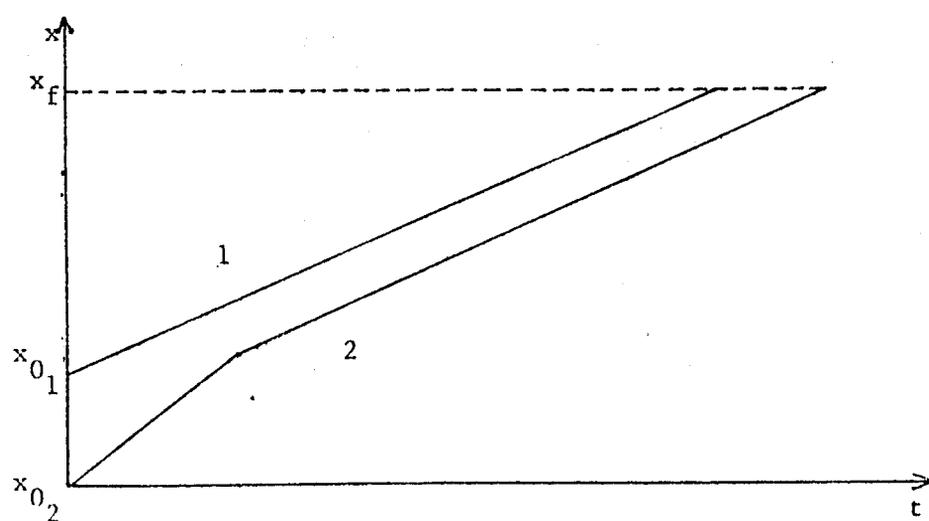


Fig. 10.2 Relação entre o custo óptimo para  $t_f$  fixado e o custo óptimo para  $t_f$  livre, para diversos valores de  $K$ ; os custos reais da energia são sempre lidos no gráfico com  $K_1 = 0$ .



a)



b)

Fig. 10.3 a) Solução ótima.

b) Solução para que converge o método iterativo, usando a sequência 1, 2.

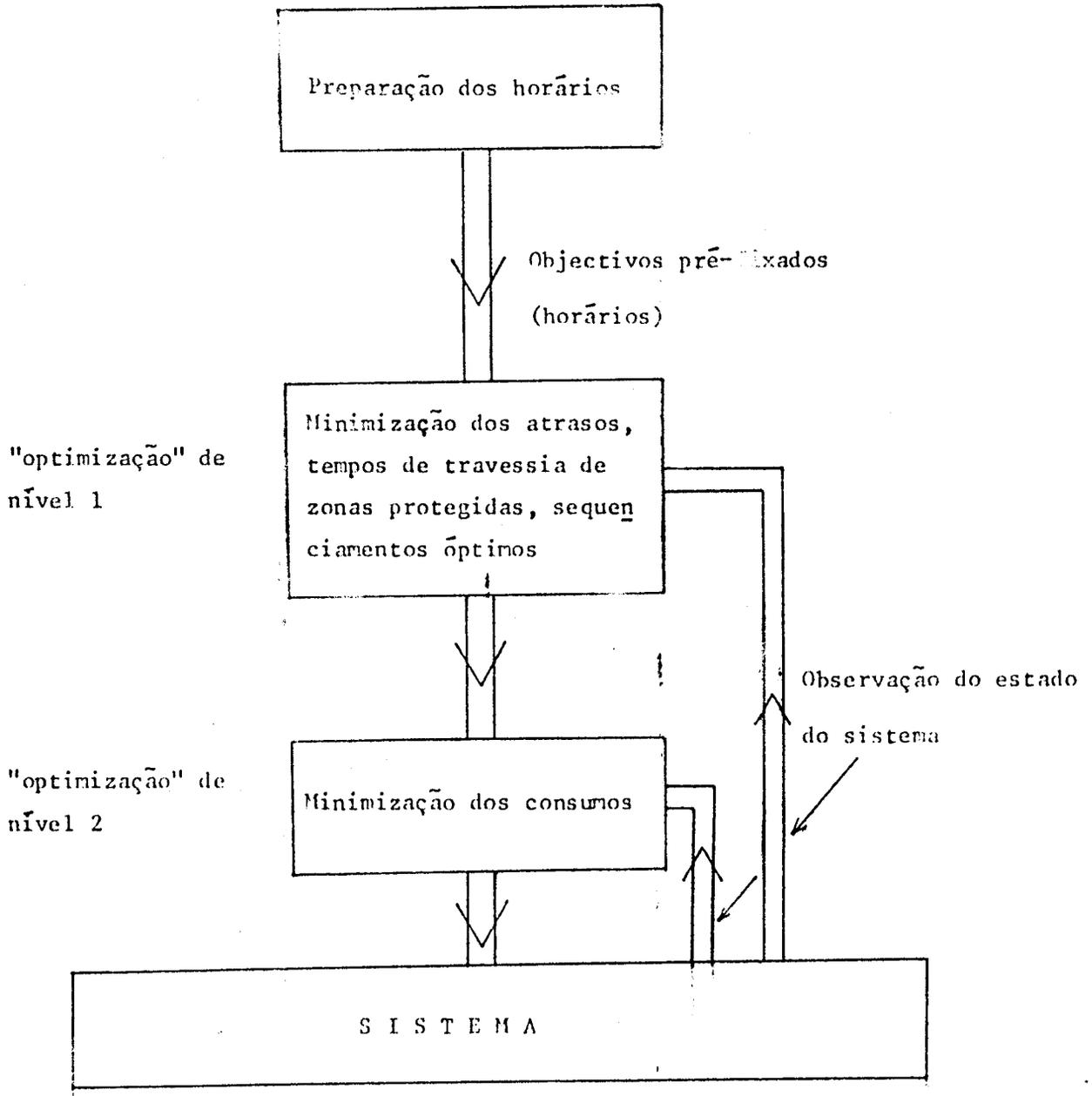


Fig. 10.4 "Optimização" utilizando dois níveis.

APÉNDICES

## Apêndice A

### Diagramas de dependências

Quando se analisam problemas relativamente complexos cujo modelo matemático envolve diversas variáveis e relações é geralmente útil representar apenas parte da estrutura do problema, ignorando voluntariamente certos aspectos da questão.

Um nível de abstracção possível corresponde a ignorar a forma das relações entre as variáveis e representar apenas o facto de dependerem ou não umas das outras. Neste trabalho o desejo de manter a discussão genérica, independentemente por exemplo da explicitação das variáveis de controle ou das características de tracção, levou-nos a adoptar algumas vezes este ponto de vista.

No presente apêndice escolhemos a representação gráfica para a explicação das dependências (em alternativa à representação funcional) por nos parecer mais clara e imediata.

Um diagrama de dependências é um grafo dirigido em que os nós representam dependências, mais especificamente: se a variável  $y$  é extremidade dos ramos vindos das variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_n$  isso significa que  $y$  depende (ou é função) de  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

As variáveis representadas por nós que não são extremidade de qualquer ramo são variáveis independentes e o seu valor é fixado em geral por condições externas ao sistema representado pelo diagrama.

Exemplo 1 (fig. 1)

A representação funcional equivalente ao diagrama da figura 1 é:

$$y = f(x)$$

$$z = g(x, y)$$

$$w = h(y, z);$$

há apenas uma variável independente (x).

Exemplo 2 (fig. 2)

A representação funcional equivalente ao diagrama da figura 2 será:

$$y = f(x, z, w)$$

$$z = g(x, y)$$

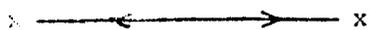
$$w = h(z)$$

Observe-se que neste caso não é possível calcular directamente os valores das variáveis dependentes pois todas elas são função de variáveis (dependentes) cujo valor é desconhecido. Veremos seguidamente como proceder em casos como este.

Convenções

(1) por vezes será indicada a forma duma função de uma só variável no ramo respectivo,

(2) pode ser conveniente "duplicar" um nó "x" num diagrama, isto é, representá-lo na seguinte forma:



trata-se de um nó apenas (e não de dois nós e um ramo).

## Ciclos e métodos iterativos

É fácil mostrar o seguinte facto:

É possível calcular directamente os valores das variáveis de um diagrama de dependências se e só se o grafo (do diagrama) for acíclico.

Assim, no exemplo 1, o cálculo é o seguinte:

dado  $x$  é calculado  $y$   
 conhecido  $x$  e  $y$  é calculado  $z$   
 conhecido  $x$ ,  $y$  e  $z$  é calculado  $w$

No exemplo 2 apenas um método iterativo poderá (se convergir) dar uma solução aproximada do conjunto de equações. Há muitos métodos iterativos possíveis, entre eles os seguintes:

### 1) método "paralelo"

iniciar  $y, z, w$ ; ( $x$  é conhecido)  
 REPEAT  
 $y, z, w := f(x, z, w), g(x, y), h(z)$   
 (atribuição paralela a  $y, z$  e  $w$ )  
 UNTIL satisfeitas condições de convergência

### 2) um método "sequencial"

iniciar  $y, z, w$ ;  
 REPEAT  
 $w := h(z)$ ;  
 $y := f(x, z, w)$ ;  
 $z := g(x, y)$ ;  
 UNTIL satisfeitas condições de convergência

A ordem das instruções entre REPEAT e UNTIL é importante.

3) métodos em que a actualização das variáveis utiliza informação sobre o estado em iterações anteriores.

É fácil confirmar-se que, em geral, temos a seguinte condição necessária de convergência para a solução: todos os nós do diagrama que sejam dependentes devem entrar iterativamente no método de solução.

Por exemplo o seguinte algoritmo para o exemplo 2:

iniciar  $y, z, w$  ;

REPEAT

$y := f(x, z, w)$ ;

$z := g(x, y)$

UNTIL satisfeitas condições de convergência

não converge normalmente para a solução (só para funções ou valores iniciais particulares).

Por outro lado se um algoritmo que satisfaz a condição anterior é convergente então converge para uma solução (pois a convergência e o uso iterativo de todas as relações impõe a sua satisfação aproximada no final).

Ainda outro algoritmo (com um duplo ciclo iterativo) para a solução do diagrama 2 é:

```

iniciar y, z, w ;
REPEAT
    REPEAT
        y: = f(x,z,w) ;
        z: = g(x,y) ;
    UNTIL satisfeitas condições de convergência em y e z ;
w: = h(z)
UNTIL satisfeitas condições (gerais) de convergência

```

Este algoritmo satisfaz também a condição necessária mencionada e, em cada iteração (externa) são satisfeitas aproximadamente e de um modo simultâneo as relações de y e z (pelo ciclo interno) para o valor de w corrente.

### Inversão de passos no diagrama

A inversão de um passo entre um nó (independente x) e um nó y é uma operação topológica no diagrama de dependências com interesse.

As regras são semelhantes à dos "gráficos de fluência" (embora aqui não estejamos directamente interessados na forma das dependências).

Essas regras aplicadas ao passo x,  $y_1$ ,  $y_2$ , z do diagrama da figura 3a) dão o diagrama da figura 3b).

Outro exemplo é dado pela figura 3.4 onde podemos observar a inversão do passo de  $P_t^I$  para N.

### Métodos iterativos para inversão de ramos

Quando se inverte um ramo (por exemplo ao inverter um passo) a inversão (se possível) de uma função relativamente complicada é muitas vezes difícil.

Então podemos recorrer a vários métodos iterativos que introduzem novos nós no diagrama. A figura 4 ilustra este ponto.

### Iterações e subproblemas

Acontece frequentemente que o conjunto de equações a resolver tem uma certa estrutura, podendo-se identificar vários subproblemas relacionados entre si. Este conjunto de relações forma os arcos de um diagrama situado a um nível hierarquicamente superior e cujos nós constituem os subproblemas. Na figura 5 estão representados dois destes diagramas.

No caso (I) o diagrama é acíclico e por isso os subproblemas podem ser resolvidos independentemente (eventualmente com ciclos iterativos internos) por uma ordem determinada (na figura a ordem é SP2; SP1; SP3; SP4).

No caso (II) o diagrama é cíclico e um algoritmo de solução plausível será:

$$(SP1, SP2, SP4)^*; SP5; SP3; (SP6; SP7)^*$$

onde  $(X)^*$  significa a repetição iterativa de X um certo número de vezes. Se, por exemplo, SP1 envolver por sua vez uma resolução iterativa:

$$SP1: (SP1_1; SP1_2; SP1_3)^*$$

temos a opção de substituir  $(SP1, SP2, SP4)^*$  no algoritmo por

a) :  $((SP1_1; SP1_2; SP1_3)^*; SP2; SP4)^*$

ou b) :  $(SP1_1; SP1_2; SP1_3; SP2; SP4)^*$

O algoritmo b) será em geral preferível pois (devido ao facto de ter um só ciclo iterativo) envolve normalmente menos esforço computacional. Todavia a velocidade e as próprias condições de convergência podem ser degradadas pela transformação  $a) \rightarrow b)$ .

### Considerações gerais sobre a convergência

Limitar-nos-emos a fazer algumas observações gerais sobre a convergência destes algoritmos iterativos.

A convergência depende em geral da ordem de consideração das várias relações dentro do algoritmo. Por exemplo se há uma variável  $x$  que "depende fortemente" das variáveis  $x_1, \dots, x_N$  (as quais "dependem pouco" das outras variáveis do diagrama) é em geral preferível usar a seguinte ordem no cálculo iterativo:

(1) actualizar os valores de  $x_1, \dots, x_N$

(2) actualizar o valor de  $x$

por razões que se compreendem facilmente.

Se há duas variáveis  $x$  e  $y$  que "dependem fortemente" uma da outra estes métodos iterativos podem divergir.

Pode fazer-se uma análise linear desta questão extraíndo algumas conclusões úteis. Em particular é possível representar por uma matriz o diagrama associado a uma certa ordem de consideração dos nós em cada iteração; as condições de convergência podem então expressar-se em termos dos valores próprios dessa matriz; é possível definir uma partição no conjunto de permutações que definem a ordem dos nós, correspondente a uma relação de equivalência das condições de convergência.

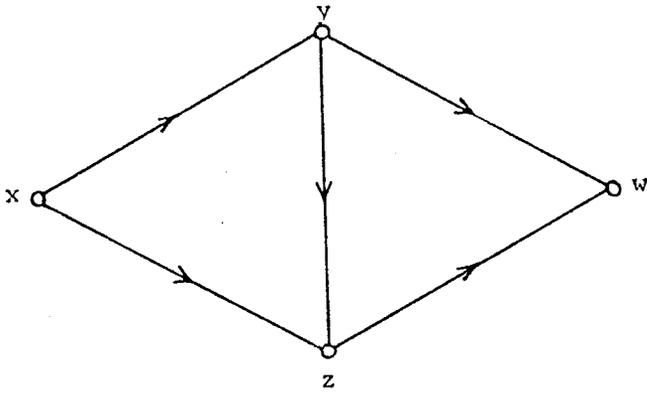


Fig. 1 Exemplo 1.

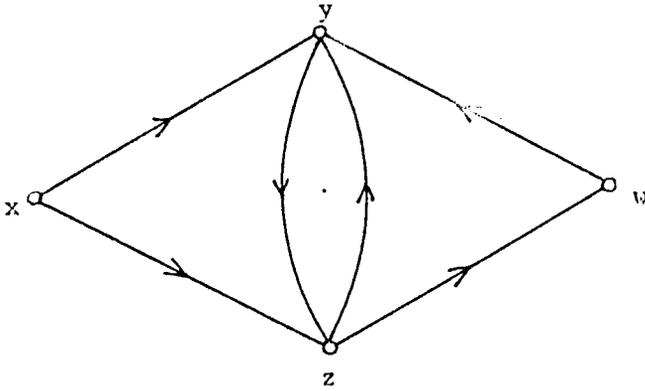
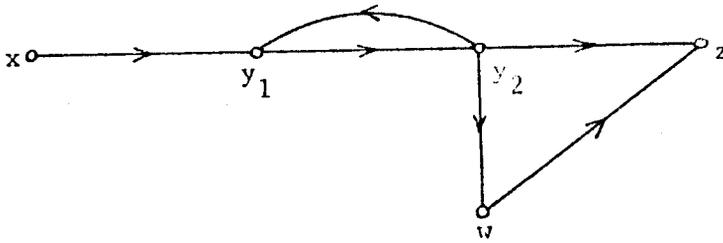


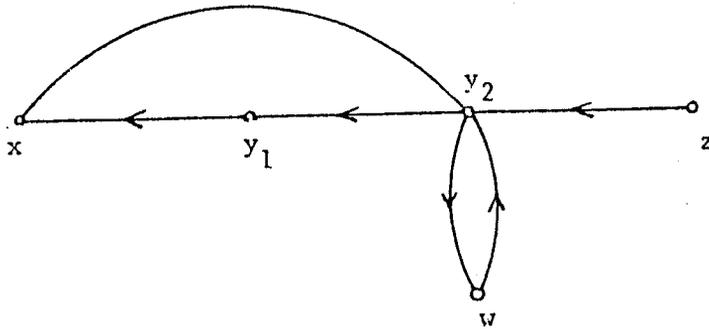
Fig. 2 Exemplo 2.

a)



$$\left\{ \begin{array}{l} z = f_1(y_2, w) \\ y_2 = f_2(y_1) \\ y_1 = f_3(x, y_2) \\ w = f_4(y_2) \end{array} \right.$$

b)



$$\left\{ \begin{array}{l} y_2 = g_1(w, z) \\ y_1 = g_2(y_2) \\ x = g_3(y_1, y_2) \\ w = f_4(y_2) \end{array} \right.$$

Fig. 3 Exemplo de inversão de um passo.

a)



b)

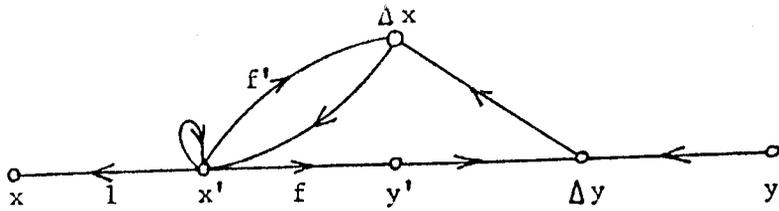
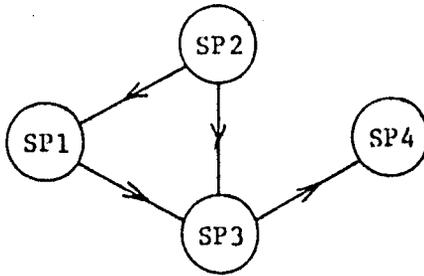


Fig.4 Exemplo de inversão iterativa de um passo. Em a) inversão directa; em b) inversão iterativa correspondente ao método de Newton ( $x' \leftarrow x' + \Delta x$  com  $\Delta x = - \Delta y / f'(x')$ )

a)



b)

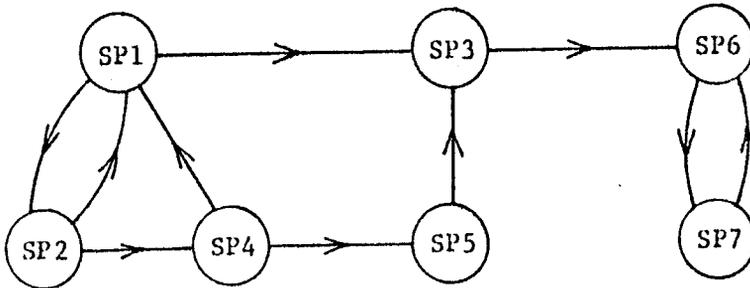


Fig.5 Em a) uma super-estrutura cíclica; em b) uma super-estrutura acíclica.

## Apêndice B

Estudo experimental das características eléctricas de uma locomotiva  
(AL 6)

Objectivo: Neste apêndice comparam-se três caracterizações dos consumos das locomotivas AL 6, respectivamente:

- (I)  $I, \varphi$  : corrente absorvida (no pantógrafo) e esfasamento
- (II)  $P, Q$ : potência activa e reactiva.
- (III)  $Z$ : impedância complexa

Trata-se de um estudo do ponto de vista entrada-saída em que apenas estamos interessados no comportamento das locomotivas como consumidores da rede.

O estudo é feito para duas grandezas de comando:

- (I) posição do graduador  $N$
- (II) força de tracção pretendida

### Caracterização da locomotiva

As seguintes aproximações polinómicas foram obtidas por CHANG ([1]) a partir das curvas características.

—  $S_0$  (velocidade referida à tensão de 22.5 kv)

$$\frac{22500 \text{ V}}{\text{Tensão no pantógrafo}} \cdot \text{velocidade real}$$

—  $N$  (posição do graduador para uma força de tração fixada) =

$$N = A + B \cdot S_0$$

$$\text{com } A = -5.640125 + 3.822097F_t - 0.7732158F_t^2 + 0.0823095F_t^3 - 0.0048616F_t^4 + \\ + 1.6810 \cdot 10^{-4}F_t^5 - 3.3872 \cdot 10^{-6}F_t^6 + 3.6823 \cdot 10^{-8}F_t^7 - 1.669 \cdot 10^{-10}F_t^8$$

$$B = 0.14851 + 0.034768F_t - 0.0013707F_t^2 + 2.7408 \cdot 10^{-5}F_t^3 - 2.0475 \cdot 10^{-7}F_t^4$$

$$\text{— } I_m \text{ (corrente nos motores)} = 1.875 + 0.270F_t + 7.5 \cdot 10^{-4}F_t^2$$

Nota: esta relação encontra-se provavelmente errada no trabalho referido, por isso foi obtida a partir das curvas características desta locomotiva.

$$\text{— } I \text{ (corrente no pantógrafo)} = 2.5 + A \cdot I_m$$

$$\text{com } A = 2.11521 + 0.541073N + 1.1695 \cdot 10^{-3}N^2$$

$$\text{— } P \text{ (factor de potência)} = 0.40085 + 1.5297 \cdot 10^{-2}S_0 - \\ - 2.050 \cdot 10^{-4}S_0^2 + 1.0 \cdot 10^{-6}S_0^3$$

Este conjunto de relações está esquematizado no diagrama da figura 1.

#### Construção das tabelas apresentadas

A primeira tabela dá-nos um conjunto de pontos das funções:

$$F_t = f_1(N, E, V)$$

$$I = f_2(N, E, V)$$

$$|Z| = E/I = f_3(N, E, V)$$

$$\cos \psi = f_4(E, V)$$

$$P = f_5(N, E, V)$$

$$Q = f_6(N, E, V)$$

Esta tabela foi construída à custa das relações representadas no diagrama da figura 2, obtido do anterior pela inversão do passo  $F_t \rightarrow N$  (obtido pela solução iterativa da equação  $N(F_t, E, V) = N_0$  e pela adjunção dos nós  $|Z|$ ,  $P$  e  $Q$ ; na segunda tabela é especificada uma força de tracção em vez do valor  $N$  do graduador. Então é calculado o valor de  $N$  pela expressão dada; como este valor não é em geral inteiro, é arredondado para o inteiro mais próximo e os restantes valores são calculados como na tabela anterior. Em particular a força de tracção real difere em geral da pretendida.

Observação: nas expressões representadas obtidas do trabalho referido as unidades são as seguintes:

velocidade: m.p.h.

tensão: kV

força de tracção: klibra

correntes: A

impedância: k $\Omega$

## Conclusões

Para a primeira tabela (N especificado) podemos observar que  $I$ ,  $P$  e  $Q$  dependem bastante da tensão no pantógrafo enquanto que  $Z$  é relativamente independente dela.

Para o segundo tipo de caracterização é mais difícil tirar conclusões devido à complexidade introduzida pelo facto de  $N$  ser discreto.

Na fase final dos processos iterativos o segundo método reduz-se ao primeiro pois para pequenas variações de  $E$ , o valor de  $N$  é constante. Este facto está ilustrado na tabela 3 onde (para valores de  $F_t$  e  $V$  determinados) esta evolução está mais detalhada.

De uma forma geral a dependência da impedância com a tensão é muito inferior à da potência ou da corrente, o que justifica em parte os métodos escolhidos para a solução das equações estáticas no capítulo 4.

\*\*\*\*\*  
 \* CARACTERISTICAS ELECTRICAS DA AL6. \*  
 \* Com o graduador em posicao fixa \*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\*\* Veloc= 20.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 20 \*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	115.794	0.6614397	0.16408	1455.225	1650.062
20	121.152	0.6526418	0.16508	1581.382	1835.862
21	126.172	0.6443498	0.16643	1707.279	2026.242
22	130.919	0.6365314	0.16804	1833.362	2221.386
23	135.518	0.6291551	0.16971	1961.032	2422.726
24	140.136	0.6221902	0.17126	2092.593	2632.989
25	145.013	0.6156080	0.17239	2231.793	2856.965
26	150.567	0.6093813	0.17268	2385.573	3103.913

\*\*\*\* Veloc= 20.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 22 \*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	144.807	0.6614397	0.13120	1819.853	2063.508
20	151.507	0.6526418	0.13200	1977.603	2295.843
21	158.676	0.6443498	0.13234	2147.110	2548.245
22	167.387	0.6365314	0.13143	2344.049	2840.158
23	179.468	0.6291551	0.12815	2597.010	3208.435

\*\*\*\* Veloc= 20.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 24 \*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	183.838	0.6614397	0.10335	2310.366	2619.695

\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 20 \*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	59.363	0.7717561	0.32006	870.467	717.255
20	62.724	0.7652150	0.31885	959.950	807.605
21	66.029	0.7536223	0.31804	1051.914	903.419
22	69.244	0.7520214	0.31771	1145.620	1004.124
23	72.363	0.7454502	0.31783	1240.697	1109.397
24	75.392	0.7389406	0.31833	1337.056	1219.136
25	78.347	0.7325180	0.31909	1434.778	1333.376
26	81.247	0.7262024	0.32001	1534.047	1452.250

Tabela 1

\*\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 22 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	72.462	0.7717561	0.26220	1062.541	875.522
20	76.495	0.7652150	0.26145	1170.710	984.917
21	80.428	0.7586223	0.26110	1281.307	1100.430
22	84.275	0.7520214	0.26104	1394.299	1222.088
23	88.065	0.7454502	0.26116	1509.912	1350.122
24	91.827	0.7387406	0.26135	1628.527	1484.901
25	95.574	0.7325180	0.26152	1750.618	1626.894
26	99.374	0.7262024	0.26158	1876.697	1776.630

\*\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 24 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	87.121	0.7717561	0.21608	1277.497	1052.643
20	91.953	0.7652150	0.21750	1407.284	1183.947
21	96.752	0.7586223	0.21704	1541.375	1323.785
22	101.570	0.7520214	0.21659	1680.429	1472.878
23	106.458	0.7454502	0.21604	1825.265	1632.102
24	111.460	0.7387406	0.21532	1976.707	1802.373
25	116.602	0.7325180	0.21440	2135.342	1984.428
26	121.876	0.7262024	0.21333	2301.185	2178.485

\*\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 26 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	103.715	0.7717561	0.18319	1520.815	1253.135
20	109.740	0.7652150	0.18224	1679.507	1412.968
21	115.921	0.7586223	0.18115	1846.752	1586.054
22	122.326	0.7520214	0.17984	2023.826	1773.861
23	128.980	0.7454502	0.17832	2211.423	1977.394
24	135.827	0.7387406	0.17669	2408.842	2196.396
25	142.718	0.7325180	0.17517	2613.588	2428.874
26	149.475	0.7262024	0.17394	2822.295	2671.808

\*\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 28 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	123.080	0.7717561	0.15436	1804.780	1487.119
20	130.998	0.7652150	0.15267	2004.834	1686.665
21	139.317	0.7586223	0.15073	2219.478	1906.163
22	147.930	0.7520214	0.14871	2447.431	2145.147
23	156.565	0.7454502	0.14690	2684.371	2400.291
24	164.952	0.7387406	0.14549	2925.356	2667.358
25	172.999	0.7325180	0.14450	3168.131	2944.225
26	180.825	0.7262024	0.14378	3414.208	3232.161

\*\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 30 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	146.485	0.7717561	0.12970	2147.973	1769.906
20	157.013	0.7652150	0.12737	2402.931	2021.626
21	167.663	0.7586223	0.12525	2671.058	2293.996
22	178.003	0.7520214	0.12359	2944.981	2581.244
23	187.929	0.7454502	0.12238	3222.121	2881.132
24	197.716	0.7387406	0.12138	3506.411	3197.167
25	207.977	0.7325180	0.12020	3808.678	3539.501
26	219.876	0.7262024	0.11824	4151.543	3930.180

\*\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 32 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	174.765	0.7717561	0.10871	2562.651	2111.597
20	187.460	0.7652150	0.10668	2868.957	2413.651
21	199.639	0.7586223	0.10518	3180.465	2731.492
22	211.665	0.7520214	0.10393	3501.893	3069.372
23	224.547	0.7454502	0.10242	3849.945	3442.516
24	240.336	0.7389406	0.09986	4262.262	3886.356
25	261.009	0.7325180	0.09578	4779.856	4442.042

\*\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 34 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	206.795	0.7717561	0.09187	3032.323	2498.601
20	221.269	0.7652150	0.09038	3386.376	2848.955
21	236.521	0.7586223	0.08878	3768.043	3236.124
22	255.247	0.7520214	0.08619	4222.933	3701.355

\*\*\*\*\* Veloc= 40.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 36 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	242.657	0.7717561	0.07829	3558.181	2931.902
20	262.773	0.7652150	0.07611	4021.568	3383.342
21	289.901	0.7586223	0.07243	4618.445	3966.478

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 20 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
20	42.752	0.8069131	0.46780	689.952	505.053
21	44.329	0.8027052	0.47372	747.247	555.172
22	46.008	0.7986674	0.47816	808.407	609.111
23	47.799	0.7946726	0.48117	873.662	667.377
24	49.705	0.7906519	0.48284	943.191	730.389
25	51.720	0.7865720	0.48337	1017.037	798.425
26	53.830	0.7824210	0.48300	1095.063	871.590

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 22 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	48.162	0.8115119	0.39449	742.608	534.721
20	50.247	0.8069131	0.39802	810.911	593.596
21	52.483	0.8027052	0.40012	884.707	657.300
22	54.873	0.7986674	0.40092	964.157	726.464
23	57.404	0.7946726	0.40066	1049.210	801.476
24	60.053	0.7906519	0.39964	1139.556	882.450
25	62.784	0.7865720	0.39818	1234.612	969.233
26	65.557	0.7824210	0.39659	1333.633	1061.474

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 24 \*\*\*\*\*

200

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	56.324	0.8115119	0.33733	868.453	625.336
20	59.191	0.8069131	0.33788	955.241	699.248
21	62.246	0.8027052	0.33736	1049.273	779.565
22	65.457	0.7986674	0.33609	1150.124	866.585
23	68.775	0.7946726	0.33442	1257.040	960.233
24	72.148	0.7906519	0.33264	1369.064	1060.177
25	75.531	0.7865720	0.33098	1485.270	1166.011
26	78.892	0.7824210	0.32956	1604.905	1277.387

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 26 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	65.937	0.8115119	0.28814	1016.678	732.067
20	69.709	0.8069131	0.28690	1124.995	823.510
21	73.643	0.8027052	0.28515	1241.387	922.298
22	77.669	0.7986674	0.28325	1364.703	1028.264
23	81.728	0.7946726	0.28141	1493.791	1141.084
24	85.779	0.7906519	0.27978	1627.713	1260.470
25	89.801	0.7865720	0.27839	1765.874	1386.300
26	93.791	0.7824210	0.27721	1907.995	1518.624

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 28 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	77.060	0.8115119	0.24655	1188.173	855.553
20	81.764	0.8069131	0.24460	1319.539	965.918
21	86.556	0.8027052	0.24261	1459.064	1084.023
22	91.373	0.7986674	0.24076	1605.497	1209.695
23	96.184	0.7946726	0.23912	1758.013	1342.919
24	100.984	0.7906519	0.23766	1916.241	1483.901
25	105.786	0.7865720	0.23632	2080.224	1633.081
26	110.620	0.7824210	0.23503	2250.345	1791.110

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 30 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	89.638	0.8115119	0.21196	1382.107	995.197
20	95.268	0.8069131	0.20993	1537.475	1125.450
21	100.937	0.8027052	0.20804	1701.487	1264.133
22	106.625	0.7986674	0.20632	1873.480	1411.612
23	112.345	0.7946726	0.20472	2053.393	1568.555
24	118.135	0.7906519	0.20315	2241.705	1735.934
25	124.048	0.7865720	0.20153	2439.332	1914.998
26	130.142	0.7824210	0.19978	2647.489	2107.207

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 32 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	103.631	0.8115119	0.18334	1597.868	1150.557
20	110.255	0.8069131	0.18139	1779.332	1302.493
21	116.947	0.8027052	0.17956	1971.361	1464.637
22	123.746	0.7986674	0.17778	2174.316	1638.284
23	130.721	0.7946726	0.17594	2389.262	1825.121
24	137.957	0.7906519	0.17396	2617.828	2027.196
25	145.538	0.7865720	0.17177	2861.904	2246.738
26	153.517	0.7824210	0.16936	3122.999	2485.678

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 34 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	119.133	0.8115119	0.15948	1836.887	1322.666
20	126.957	0.8069131	0.15753	2048.874	1499.800
21	134.995	0.8027052	0.15556	2275.599	1690.673
22	143.358	0.7986674	0.15346	2518.904	1897.921
23	152.169	0.7946726	0.15114	2781.281	2124.578
24	161.527	0.7906519	0.14858	3065.091	2373.548
25	171.420	0.7865720	0.14583	3370.873	2646.304
26	181.656	0.7824210	0.14312	3695.420	2941.284

\*\*\*\*\* Veloc= 60.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 36 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	136.420	0.8115119	0.13927	2103.437	1514.597
20	145.844	0.8069131	0.13713	2353.674	1722.918
21	155.783	0.8027052	0.13480	2626.016	1951.018
22	166.406	0.7986674	0.13220	2923.883	2203.060
23	177.786	0.7946726	0.12936	3249.489	2482.235
24	189.748	0.7906519	0.12648	3600.609	2788.243
25	201.857	0.7865720	0.12384	3969.394	3116.174
26	213.707	0.7824210	0.12166	4347.446	3460.248

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 20 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
26	41.999	0.8091448	0.61905	883.577	641.662

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 22 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
24	46.218	0.8168750	0.51927	906.112	639.827
25	47.664	0.8127620	0.52450	968.489	694.222
26	49.186	0.8091448	0.52859	1034.780	751.468

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 24 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
22	50.023	0.8278171	0.43979	911.023	617.385
23	51.789	0.8217592	0.44410	978.846	678.764
24	53.659	0.8168750	0.44726	1051.991	742.835
25	55.639	0.8127620	0.44932	1130.539	810.382
26	57.732	0.8091448	0.45034	1214.573	882.035

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 26 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
20	53.234	0.8460800	0.37569	900.812	567.539
21	55.316	0.8356365	0.37963	970.718	638.075
22	57.530	0.8278171	0.38240	1047.738	710.035
23	59.884	0.8217592	0.38407	1131.850	784.862
24	62.385	0.8168750	0.38470	1223.058	863.630
25	65.027	0.8127620	0.38445	1321.295	947.117
26	67.799	0.8091448	0.38348	1426.354	1035.833

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 28 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	58.082	0.8604199	0.32712	949.529	562.361
20	60.617	0.8460800	0.32993	1025.738	646.246
21	63.325	0.8356365	0.33161	1111.260	730.456
22	66.216	0.8278171	0.33224	1205.924	817.235
23	69.287	0.8217592	0.33195	1309.564	908.095
24	72.526	0.8168750	0.33091	1421.879	1004.022
25	75.907	0.8127620	0.32934	1542.371	1105.586
26	79.396	0.8091448	0.32746	1670.330	1213.011

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 30 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	65.807	0.8604199	0.28871	1075.826	637.160
20	69.048	0.8460800	0.28965	1168.406	736.131
21	72.514	0.8356365	0.28959	1272.519	836.455
22	76.199	0.8278171	0.28871	1387.741	940.449
23	80.075	0.8217592	0.28722	1513.467	1049.488
24	84.105	0.8168750	0.28535	1648.884	1164.316
25	88.242	0.8127620	0.28331	1793.002	1285.242
26	92.445	0.8091448	0.28124	1944.857	1412.375

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 32 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	74.566	0.8604199	0.25480	1219.009	721.960
20	78.640	0.8460800	0.25432	1330.719	838.393
21	82.972	0.8356365	0.25309	1456.031	957.082
22	87.524	0.8278171	0.25135	1593.994	1080.223
23	92.244	0.8217592	0.24933	1743.468	1208.977
24	97.079	0.8168750	0.24721	1903.246	1343.927
25	101.935	0.8127620	0.24513	2072.250	1485.409
26	106.935	0.8091448	0.24313	2249.691	1633.749

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\* Pos. graduador= 34 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	84.452	0.8604199	0.22497	1380.624	817.677
20	89.460	0.8460800	0.22356	1513.817	953.750
21	94.725	0.8356365	0.22169	1662.277	1092.652
22	100.182	0.8278171	0.21959	1824.523	1236.449
23	105.772	0.8217592	0.21744	1999.145	1386.273
24	111.451	0.8168750	0.21533	2185.011	1542.888
25	117.201	0.8127620	0.21330	2381.421	1707.026
26	123.024	0.8091448	0.21134	2588.156	1879.545

\*\*\*\*\* Veloc= 80.000 km/h \*\*\*\*\* Pos. graduador= 36 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	95.522	0.8604199	0.19890	1561.593	924.856
20	101.533	0.8460800	0.19698	1718.100	1082.455
21	107.774	0.8356365	0.19485	1891.260	1243.167
22	114.179	0.8278171	0.19267	2079.429	1409.194
23	120.707	0.8217592	0.19054	2281.434	1582.021
24	127.350	0.8168750	0.18845	2496.699	1762.978
25	134.125	0.8127620	0.18639	2725.308	1953.527
26	141.079	0.8091448	0.18429	2967.991	2155.385

\*\*\*\*\* Veloc=100.000 km/h \*\*\*\*\* Pos. graduador= 26 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
25	53.234	0.8460800	0.46962	1126.015	709.423
26	54.890	0.8374815	0.47367	1195.204	779.883

\*\*\*\*\* Veloc=100.000 km/h \*\*\*\*\* Pos. graduador= 28 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
23	56.638	0.8716473	0.40608	1135.482	638.489
24	58.576	0.8571605	0.40972	1205.018	724.069
25	60.617	0.8460800	0.41242	1282.173	807.807
26	62.769	0.8374815	0.41421	1366.776	891.835

\*\*\*\*\* Veloc=100.000 km/h \*\*\*\*\* Pos. graduador= 30 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
22	61.637	0.8908183	0.35692	1207.977	616.125
23	63.970	0.8716473	0.35954	1282.465	721.139
24	66.437	0.8571605	0.36124	1366.748	821.249
25	69.048	0.8460800	0.36206	1460.507	920.163
26	71.803	0.8374815	0.36209	1563.490	1020.193

\*\*\*\*\* Veloc=100.000 km/h \*\*\*\*\* Pos. graduador= 32 \*\*\*\*\*

E(KV)	I	COSFI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
20	63.966	0.9510593	0.31266	1216.723	395.325
21	66.565	0.9164542	0.31547	1281.112	559.355
22	69.325	0.8908183	0.31734	1358.633	692.967
23	72.253	0.8716473	0.31832	1448.537	814.522
24	75.359	0.8571605	0.31847	1550.281	931.531
25	78.640	0.8460800	0.31790	1663.399	1047.991
26	82.086	0.8374815	0.31673	1787.403	1166.299

\*\*\*\*\*  
 \* CARACTERISTICAS ELECTRICAS DA .AL6. \*  
 \* Com esforco tractivo fixado \*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\* Veloc= 40.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 10.000 Ton \*\*\*

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	21	9.763	105.19	0.6990	0.18031	1397.193	1429.292
20	21	10.525	110.76	0.6901	0.18056	1528.945	1602.982
21	20	10.159	103.65	0.6817	0.20259	1484.003	1592.460

\*\*\* Veloc= 40.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 15.000 Ton \*\*\*

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	25	14.390	161.08	0.6990	0.11795	2139.447	2188.598
20	25	15.468	169.67	0.6901	0.11787	2342.194	2455.610
21	24	15.085	160.64	0.6817	0.13072	2299.861	2467.944
22	23	14.614	151.18	0.6736	0.14551	2240.754	2457.997
23	23	15.479	157.55	0.6660	0.14597	2413.491	2703.184
24	22	14.824	146.85	0.6586	0.16342	2321.572	2652.019
25	22	15.591	152.27	0.6516	0.16417	2480.922	2887.526
26	21	14.787	140.75	0.6450	0.18471	2360.575	2796.615

\*\*\* Veloc= 40.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 20.000 Ton \*\*\*

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	28	20.166	227.89	0.6990	0.08337	3026.830	3096.367
20	27	19.750	217.09	0.6901	0.09212	2996.807	3141.922
21	26	19.054	204.37	0.6817	0.10275	2926.026	3139.872
24	24	18.869	188.78	0.6586	0.12713	2984.301	3409.079
26	23	19.029	182.85	0.6450	0.14218	3066.582	3633.034

\*\*\* Veloc= 60.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 10.000 Ton \*\*\*

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	29	10.434	146.97	0.7627	0.12927	2129.876	1806.036
20	27	9.639	130.35	0.7556	0.15343	1969.950	1707.609
21	26	9.620	125.79	0.7485	0.16693	1977.495	1751.650
22	26	10.440	133.06	0.7415	0.16533	2170.808	1964.016
23	25	10.272	127.01	0.7346	0.18108	2146.083	1982.086
24	24	10.035	120.51	0.7278	0.19914	2105.105	1983.545
25	23	9.740	113.71	0.7211	0.21985	2050.036	1969.470
26	23	10.368	118.68	0.7146	0.21906	2205.174	2158.597

Tabela 2

\*\*\* Veloc= 60.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 15.000 Ton \*\*\*

205

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	34	15.577	226.88	0.7627	0.08374	3287.839	2787.935
20	32	14.665	205.06	0.7556	0.09752	3099.068	2686.361
21	31	14.761	199.96	0.7485	0.10501	3143.410	2784.409
22	30	14.745	193.77	0.7415	0.11353	3161.224	2860.084
23	29	14.626	186.67	0.7346	0.12321	3154.020	2913.001
24	28	14.415	178.82	0.7278	0.13420	3123.693	2943.315
25	28	15.366	187.24	0.7211	0.13351	3375.723	3243.058
26	27	14.983	177.83	0.7146	0.14620	3304.158	3234.369

\*\*\* Veloc= 60.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 20.000 Ton \*\*\*

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
20	35	19.165	271.07	0.7556	0.07378	4096.566	3551.021
21	34	19.567	267.62	0.7485	0.07846	4207.071	3726.591
22	33	19.742	261.80	0.7415	0.08403	4271.027	3864.167
23	32	19.686	253.74	0.7346	0.09064	4287.328	3959.705
24	31	19.407	243.73	0.7278	0.09846	4257.430	4011.585
25	30	18.932	232.15	0.7211	0.10768	4185.289	4020.809

\*\*\* Veloc= 60.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 25.000 Ton \*\*\*

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	27	8.796	122.53	0.7627	0.15506	1775.671	1505.687
20	26	8.838	118.79	0.7556	0.16835	1795.286	1556.205
21	24	8.072	104.12	0.7485	0.20167	1636.889	1449.944
22	23	7.965	99.41	0.7415	0.22129	1621.858	1467.359
23	22	7.803	94.35	0.7346	0.24376	1594.229	1472.404
24	21	7.593	89.04	0.7278	0.26951	1555.443	1465.624
25	21	8.062	92.57	0.7211	0.27005	1668.973	1603.383
26	20	7.764	86.63	0.7146	0.30009	1609.738	1575.738

\*\*\* Veloc= 80.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 10.000 Ton \*\*\*

L(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
19	36	10.164	176.94	0.7949	0.10737	2672.645	2039.592
20	34	9.752	162.83	0.7901	0.12282	2573.121	1996.253
21	33	9.991	160.94	0.7851	0.13047	2653.731	2093.113
22	32	10.150	158.05	0.7801	0.13918	2712.690	2175.528
23	31	10.231	154.26	0.7749	0.14908	2749.749	2242.452
24	30	10.237	149.68	0.7697	0.16033	2765.302	2293.237
25	29	10.173	144.42	0.7644	0.17309	2760.279	2327.641
26	28	10.044	138.61	0.7591	0.18757	2736.008	2345.779

\*\*\* Veloc= 80.000km/h \*\* Esf. tractivo pretendido= 15.000 Ton \*\*\*

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
23	36	15.060	233.88	0.7749	0.09833	4168.906	3399.791
24	35	15.178	228.92	0.7697	0.10483	4229.211	3507.243
25	34	15.201	222.91	0.7644	0.11215	4260.290	3592.544
26	33	15.135	215.98	0.7591	0.12037	4263.191	3655.144

\*\*\*\*\*  
 \* CARACTERISTICAS ELECTRICAS DA AL6. \*  
 \* Com esforço tractiveo fixado \*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\* Veloc= 80.000km/h \*\* Esf. tractiveo pretendido= 10.000 Ton \*\*\*

E(KV)	N	T.E.	I	FI	Z(KOHM)	P(KW)	Q(KVAR)
21.0	33	9.991	160.74	0.7851	0.13047	2653.731	2093.113
21.1	33	10.070	162.04	0.7846	0.13021	2682.829	2119.578
21.2	33	10.189	163.14	0.7841	0.12994	2712.152	2146.306
21.3	33	10.289	164.25	0.7836	0.12967	2741.695	2173.295
21.4	33	10.390	165.36	0.7831	0.12940	2771.457	2200.542
21.5	32	9.688	153.06	0.7826	0.14045	2575.696	2048.514
21.6	32	9.779	154.05	0.7821	0.14020	2602.685	2073.429
21.7	32	9.871	155.04	0.7816	0.13995	2629.880	2098.587
21.8	32	9.963	156.04	0.7811	0.13970	2657.281	2123.991
21.9	32	10.056	157.05	0.7806	0.13944	2684.888	2149.640
22.0	32	10.150	158.05	0.7801	0.13918	2712.690	2175.528
22.1	32	10.244	159.07	0.7796	0.13893	2740.691	2201.658
22.2	32	10.339	160.08	0.7790	0.13867	2768.881	2228.023
22.3	31	9.622	147.88	0.7785	0.15078	2567.689	2069.588
22.4	31	9.707	148.78	0.7780	0.15055	2593.158	2093.614
22.5	31	9.793	149.68	0.7775	0.15031	2618.812	2117.866
22.6	31	9.880	150.59	0.7770	0.15006	2644.646	2142.341
22.7	31	9.967	151.50	0.7765	0.14982	2670.658	2167.037
22.8	31	10.055	152.42	0.7760	0.14958	2696.847	2191.955
22.9	31	10.143	153.34	0.7754	0.14933	2723.211	2217.093
23.0	31	10.231	154.26	0.7749	0.14908	2749.749	2242.452
23.1	31	10.320	155.19	0.7744	0.14884	2776.451	2268.025
23.2	31	10.410	156.12	0.7739	0.14859	2803.316	2293.811
23.3	30	9.664	143.87	0.7734	0.16194	2592.664	2125.003
23.4	30	9.745	144.69	0.7728	0.16172	2616.863	2148.435
23.5	30	9.826	145.51	0.7723	0.16149	2641.216	2172.066
23.6	30	9.907	146.34	0.7718	0.16126	2665.730	2195.901
23.7	30	9.989	147.17	0.7713	0.16103	2690.394	2219.934
23.8	30	10.071	148.00	0.7707	0.16080	2715.215	2244.172
23.9	30	10.154	148.84	0.7702	0.16056	2740.187	2268.606
24.0	30	10.237	149.68	0.7697	0.16033	2765.302	2293.237
24.1	30	10.321	150.52	0.7692	0.16010	2790.567	2318.067
24.2	30	10.405	151.37	0.7686	0.15986	2815.968	2343.085
24.3	29	9.638	139.17	0.7681	0.17460	2597.866	2165.228
24.4	29	9.714	139.91	0.7676	0.17439	2620.665	2187.885
24.5	29	9.789	140.65	0.7671	0.17418	2643.597	2210.723
24.6	29	9.865	141.40	0.7665	0.17396	2666.668	2233.745
24.7	29	9.942	142.15	0.7660	0.17375	2689.873	2256.948
24.8	29	10.018	142.91	0.7655	0.17353	2713.212	2280.334
24.9	29	10.096	143.66	0.7650	0.17331	2736.682	2303.899
25.0	29	10.173	144.42	0.7644	0.17309	2760.279	2327.641
25.1	29	10.251	145.18	0.7639	0.17287	2784.000	2351.557
25.2	29	10.329	145.95	0.7634	0.17265	2807.848	2375.652
25.3	29	10.407	146.71	0.7628	0.17243	2831.820	2399.922
25.4	28	9.619	134.56	0.7623	0.18875	2605.672	2211.938
25.5	28	9.689	135.23	0.7618	0.18856	2627.103	2233.836
25.6	28	9.759	135.90	0.7612	0.18836	2648.653	2255.900
25.7	28	9.830	136.57	0.7607	0.18817	2670.319	2278.125

Tabela 3

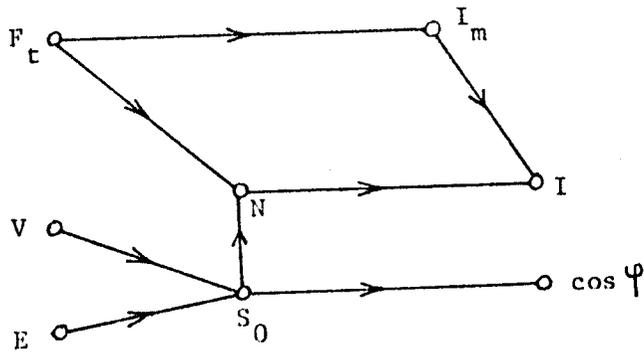


Fig. 1 Diagrama de dependências original.

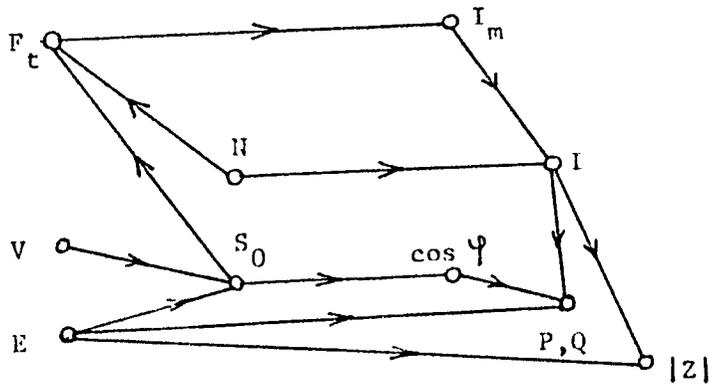


Fig. 2 Diagrama de dependências com inversão do passo  $F_t \rightarrow N$ .

Apêndice C

Algumas curvas características para as locomotivas U.T.E. - Si

$$\alpha (F_t) = \frac{0.03939 F_t + 0.214145}{F_t + 0.71736} \quad 0 \leq F_t \leq 12$$

$$\beta (F_t) = 0.246 \cdot F_t + 3.1 \quad 0 \leq F_t \leq 12$$

$$F_{t28}(V) = \frac{-1.1820 \cdot V + 274.0}{V - 34.373} \quad 50 \leq V \leq 110$$

$$F_{t29}(V) = \frac{-1.1304 \cdot V + 374.85}{V - 29.711} \quad 60 \leq V \leq 120$$

$$F_{t30}(V) = \frac{-1.5562 \cdot V + 524.41}{V - 23.846} \quad 70 \leq V \leq 120$$

$$I_m(F_t) = 42.17 \cdot F_t + 93.097 \quad 0.5 \leq F_t \leq 12$$

$$I_{m29}(F_t) = (-0.202F_t + 42.490)F_t + 166.36 \quad 2 \leq F_t \leq 10$$

$$I_{m30}(F_t) = (-10 F_t + 52.67)F_t + 197.33 \quad 3 \leq F_t \leq 10$$

$$\cos \varphi (V) = 0.810$$

As unidades usadas são:

Tensão - V

corrente - A

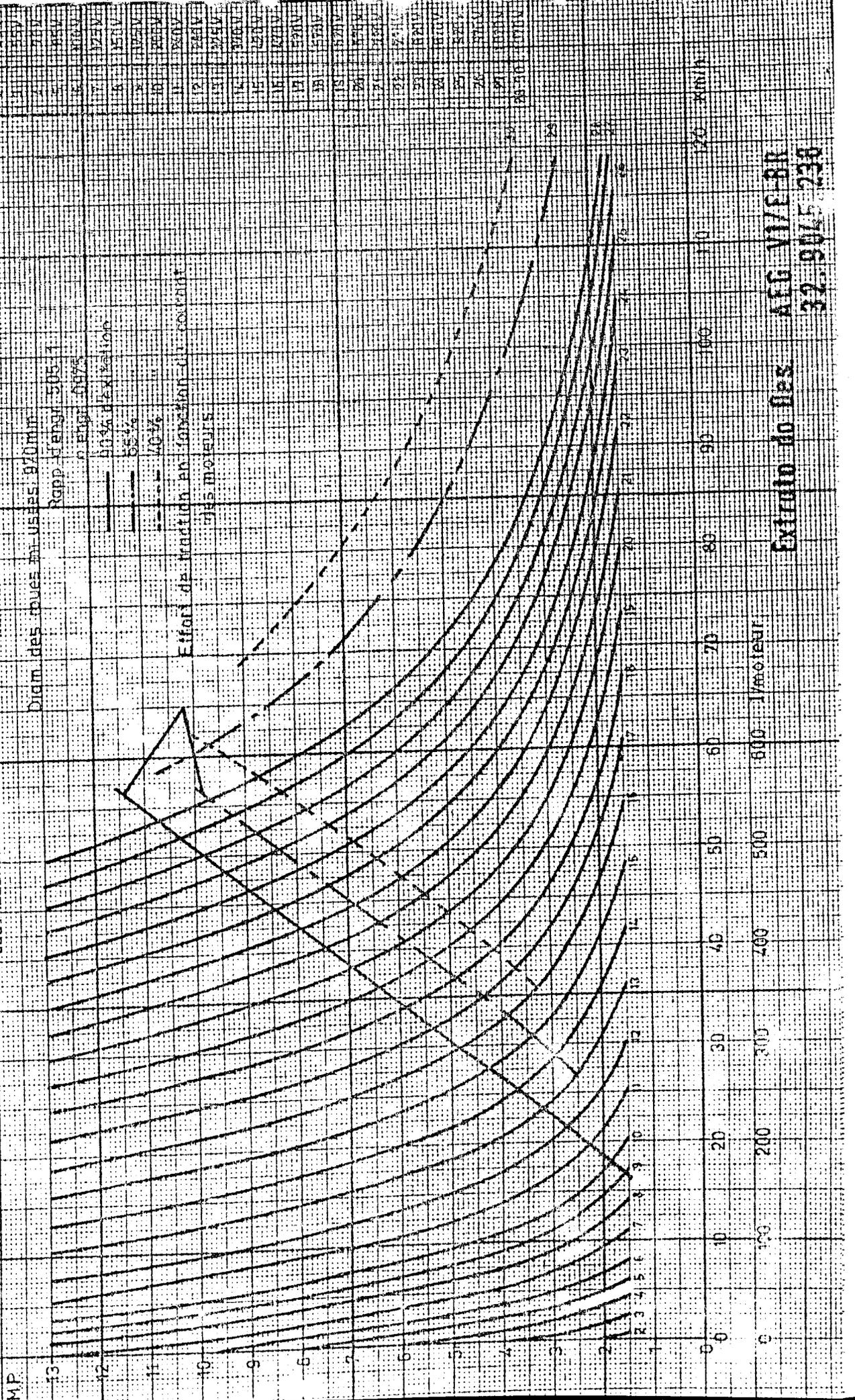
velocidade - km/h

Força - tonelada

Notas:

- 1- Para estes casos pareceu-nos que as aproximações racionais simples dão melhores resultados que as polinomiais. De qualquer forma as aproximações polinomiais de graus elevados são em geral de evitar por introduzirem oscilações indesejáveis.
- 2- É importante evitar o uso destas fórmulas fora da zona onde são válidas por levarem a resultados errados ou até absurdos.

Courbes des crans de marche pour 25KV-50 Hz  
pour une automotrice à 4 moteurs M0-400  
Par moteur en régime continu  
850V 295KW 580A 1800 tr/min à 8.5% d'excitation



M.P.

Diam des roues en usage: 970mm

Rapp d'engr 505:1

n Eng 0.0975

— 80% d'excitation

— 85%

- · - · 90%

600 A/moteur

Extrait des AEG VI/E-8R  
32.9045.238

Leistungsfaktor und Oberstrom über Geschwindigkeit der 3-ten Messfahrt  
 zwischen Carregado und Azambuja

km 35 bis km 47 Tag der Messfahrt 4.3.1975

Leistungsfaktor  $\lambda$  gerechnet aus den gemessenen Werten der Wirkleistung, der Oberspannung und des Oberstromes

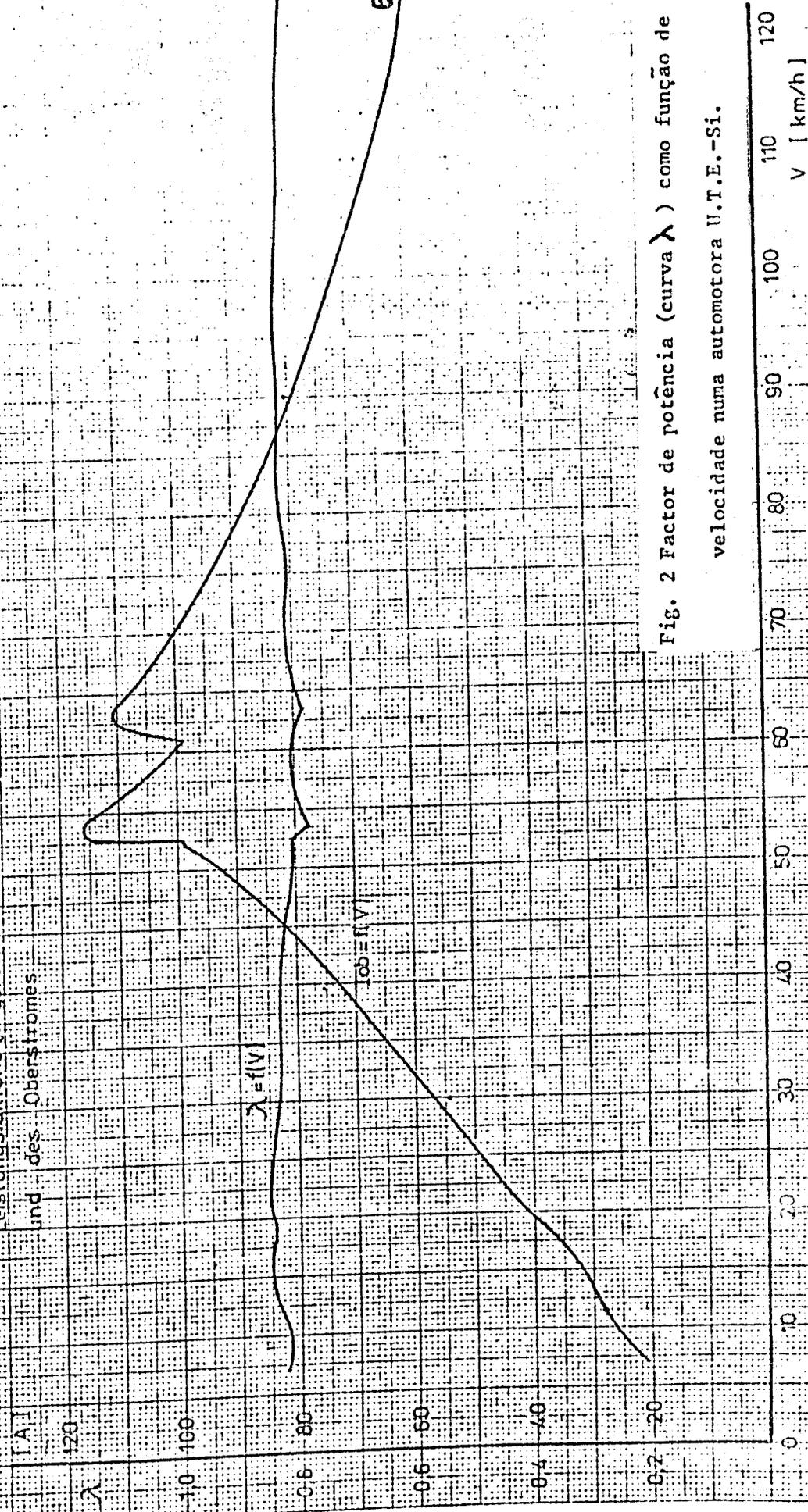


Fig. 2 Factor de potência (curva  $\lambda$ ) como função de velocidade numa automotora U.T.E.-Si.

Tag 15.7.75 Name A.C. J.P.

CP 5

AEG-TELEFUNKEN V11/E/BR  
 32.0070.291

## Apêndice D

### Implementação da lista de acontecimentos

Neste apêndice descrevemos sucintamente o método usado no programa para uma representação eficiente da lista dos acontecimentos com vista às 3 operações fundamentais usadas:

A - selecção do acontecimento com menor tempo de ocorrência (ou um dos acontecimentos com esse tempo mínimo)

B - introdução de um acontecimento do tipo H1 na lista

C - introdução de um acontecimento do tipo H2 na lista se o seu tempo for inferior ao menor dos tempos da lista (se esse menor tempo corresponder a outro acontecimento do tipo H2, este é retirado da lista).

Cada nó da lista tem a seguinte estrutura:

TYPE ACONTECIMENTO = RECORD

TEMPO: REAL; (tempo de ocorrência)

TIPO: TIPOS DE ACONTECIMENTOS (caracteriza o tipo de acontecimento em questão, exemplo: paragem de um comboio, impressão de resultados, etc)

COMBOIO: 1.. N-DE-COMBOIOS (indica o comboio a que diz respeito o acontecimento ou é zero se não se referir a nenhum comboio particular)

END

O problema de encontrar algoritmos eficientes para o tipo de operações referidas ocorre na simulação discreta e tem tido várias soluções (ver [7] - [10] ).

No nosso caso escolhemos uma estrutura que permite tempos de execução de respectivamente  $O(\ln n)$ ,  $O(\ln n)$ ,  $O(1)$  para as operações A, B, e C, sendo  $n$  o número de acontecimentos na lista.

A estrutura que usamos (e a que chamamos HEAP + 1) é constituída por um "HEAP" ([4] , [5] ) e por um nó auxiliar.

O "HEAP" contém nós correspondentes aos acontecimentos H1 na lista e o nó auxiliar pode estar vazio ou conter um acontecimento do tipo H2 (ver figura 1).

#### Implementação das várias operações:

A: se o nó auxiliar não está vazio, então contém o acontecimento procurado e o seu estado passa a "vazio"; se já estava "vazio" o acontecimento procurado está na cabeça do "HEAP", sendo extraído e rearranjando-se o "HEAP".

B: o acontecimento em questão é introduzido de forma usual no "HEAP" e, se o seu tempo é inferior ao do nó auxiliar (não estando este vazio), o estado deste nó passa a vazio

C: sejam  $T'$ ,  $T_a$  e  $T_c$  os instantes de ocorrência do acontecimento em questão, do acontecimento no nó auxiliar e do acontecimento na "cabeça" do "HEAP", respectivamente.

Se o nó auxiliar não está vazio e se  $T' < T_a$  então o acontecimento

do nó auxiliar é substituído pelo novo acontecimento; se  $T' \geq T_a$  nada se faz.

Se o nó auxiliar está vazio e  $T' < T_c$  então o novo acontecimento é introduzido no nó auxiliar; se  $T' \geq T_c$  nada se faz.

É de admitir que a utilização deste método (como alternativa às listas lineares) não seja justificável para problemas da dimensão das simulações efectuadas, mas ele torna-se interessante (por ser mais eficiente) para simulações mais complexas e de maiores dimensões.

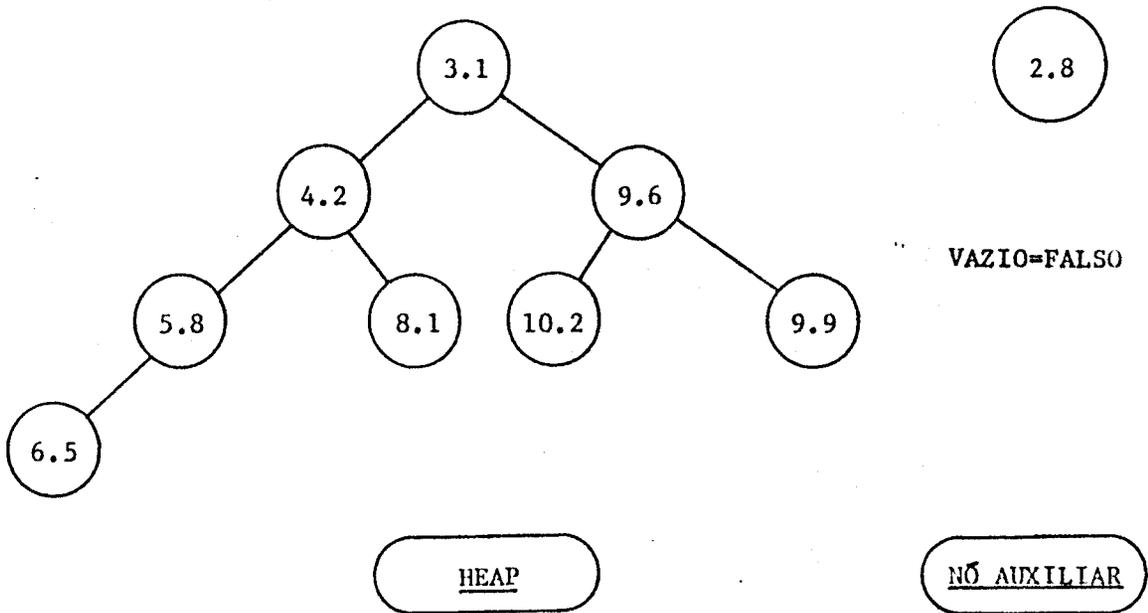


Fig. 1 HEAP + 1: a estrutura usada para lista de acontecimentos (apenas es-  
tão indicados os tempos de ocorrência).

## Apêndice E

Descrição da linguagem usada nos programas de protecção

Neste apêndice descreve-se resumidamente a sintaxe e a semântica da linguagem de protecção (designada por PROTLANG) criada para exprimir os algoritmos de protecção.

### 1- Sintaxe da linguagem

Cada programa de protecção deve obedecer à seguinte sintaxe (descrita em BNF).

$\langle \text{PROGRAMA} \rangle ::= \langle \text{LISTA DE INSTRUÇÕES} \rangle . \mid \text{GO} \mid \text{NO}$

$\langle \text{LISTA DE INSTRUÇÕES} \rangle ::= \langle \text{INSTRUÇÃO} \rangle \mid \langle \text{LISTA DE INSTRUÇÕES} \rangle ;$   
 $\langle \text{INSTRUÇÃO} \rangle$

$\langle \text{INSTRUÇÃO} \rangle ::= \text{BEGIN} \langle \text{CAMINHOS} \rangle \langle \text{CONDIÇÕES} \rangle \langle \text{ACÇÕES V} \rangle$   
 $\langle \text{ACÇÕES F} \rangle \text{ END}$

$\langle \text{CAMINHOS} \rangle ::= \text{ON PATHS} \langle \text{LISTA DE CAMINHOS} \rangle$

$\langle \text{LISTA DE CAMINHOS} \rangle ::= \text{ALL} \mid \langle \text{LISTA DE INTEIROS} \rangle$

$\langle \text{LISTA DE INTEIROS} \rangle ::= \langle \text{INTEIRO} \rangle \mid \langle \text{LISTA DE INTEIROS} \rangle ,$   
 $\langle \text{INTEIRO} \rangle$

$\langle \text{CONDIÇÕES} \rangle ::= \text{IF} \langle \text{CONDS} \rangle \mid \text{IF}$

$\langle \text{CONDS} \rangle ::= \langle \text{COND} \rangle \mid \langle \text{CONDS} \rangle , \langle \text{COND} \rangle$

$\langle \text{COND} \rangle \quad :: = \text{TRUE} \mid \text{FALSE} \mid \langle \text{SE ZERO} \rangle \mid \text{HEADAWAY}$   
 $\langle \text{SE ZERO} \rangle \quad :: = \langle \text{LISTA DE VARIÁVEIS} \rangle = 0$   
 $\langle \text{LISTA DE VARIÁVEIS} \rangle \quad :: = \langle \text{VARIÁVEL} \rangle \mid \langle \text{LISTA DE VARIÁVEIS} \rangle ,$   
 $\quad \quad \quad \langle \text{VARIÁVEL} \rangle$   
 $\langle \text{VARIÁVEL} \rangle \quad :: = N \langle \text{INTEIRO} \rangle$   
 $\langle \text{ACÇÕES V} \rangle \quad :: = \text{THEN} \langle \text{LISTA DE ACÇÕES} \rangle \mid \text{THEN}$   
 $\langle \text{ACÇÕES F} \rangle \quad :: = \text{ELSE} \langle \text{LISTA DE ACÇÕES} \rangle \mid \text{ELSE}$   
 $\langle \text{LISTA DE ACÇÕES} \rangle \quad :: = \langle \text{ACÇÃO} \rangle \mid \langle \text{LISTA DE ACÇÕES} \rangle , \langle \text{ACÇÃO} \rangle$   
 $\langle \text{ACÇÃO} \rangle \quad :: = \text{SETGO} \mid \text{SETNO} \mid \text{SUCCEED} \mid \text{FAIL} \mid \text{NEXT} \mid \langle \text{INCR} \rangle \mid$   
 $\quad \quad \quad \mid \langle \text{DECR} \rangle$   
 $\langle \text{INCR} \rangle \quad :: = \text{INC} ( \langle \text{LISTA DE VARIÁVEIS} \rangle )$   
 $\langle \text{DECR} \rangle \quad :: = \text{DEC} ( \langle \text{LISTA DE VARIÁVEIS} \rangle )$

## 2- Semântica da linguagem

Todos os comboios no seu percurso interpretam (em cada momento de discretização temporal) o programa de protecção associado; se não houver qualquer protecção o programa respectivo é "GO"; a proibição permanente corresponde ao programa "NO". Dois casos particulares de interpretação são:

- (i) ao passar por um ponto de protecção
- (ii) ao tentar passar de um estado passivo (fora da rede ferroviária principal) para um estado activo.

A execução do programa pode ter dois resultados: sucesso e insucesso to-  
mando-se então as medidas respectivas.

Cada comboio tem um caminho (inteiro positivo) associado, e cada instrução  
pode ser aplicável apenas a certos caminhos indicados em <LISTA DE CAMINHOS> .  
Se a instrução é aplicável é feita uma análise das condições ( <COND > ) e se  
a sua conjunção exprime um predicado verdadeiro um conjunto de acções é execu-  
tado ( <ACÇÕES V > ); em caso contrário outro conjunto de acções ( <ACÇÕES F > )  
é executado.

As condições podem ser do seguinte tipo:

FALSE: é imediatamente executado <ACÇÕES F >

TRUE: é imediatamente executado <ACÇÕES V >

SE ZERO: seja, por exemplo, N1, N10=0: se  $N1=0 \wedge N10=0$  a análise das  
condições prossegue; se não <ACÇÕES F > é executado

HEADAWAY: se o comboio verifica as restrições de distância mínima entre  
composições a análise continua; se não <ACÇÕES F > é executado. Se não há  
mais condições na lista <ACÇÕES V > é executado.

As acções possíveis tanto em ACCÇÕES V como em ACCÇÕES F são:

SETGO: faz com que o programa futuro passe a ser GO (até ao novo ponto  
de protecção).

(GO é um programa que tem sempre "sucesso" como resultado)

SETNO: idêntico a SETGO, mas NO é um programa que falha sempre.

SUCCEED: o programa termina imediatamente com "sucesso".

FAIL: o programa termina imediatamente com "insucesso".

< INCR > : por exemplo, INC(N1,N2) traduz-se em:  $N1:=N1+1; N2:=N2+1$

<DECR> : por exemplo, DEC(N8) traduz-se em: N8:=N8-1

NEXT: a análise prossegue na instrução seguinte.

### Observações

— se as acções FAIL ou SUCCEED não existirem então <ACÇÕES V> termina com "sucesso" e <ACÇÕES F> com "insucesso"

— na simulação de um ponto de protecção (um semáforo, por exemplo) a acção "SETGO" deve ser incluída em <ACÇÕES V> mas não em <ACÇÕES F> ; desta forma, após a autorização de passagem por esse ponto o comboio respectivo fica livre de protecções (até que novo ponto de protecção apareça)

— foi construído um "assembler" da linguagem de protecção descrita (PROTLANG) o qual está integrado num programa geral de preparação de dados.

## Apêndice F

### Manual de utilização do programa de simulação

Este manual descreve o conjunto de operações e dados necessários para a execução do programa de simulação realizado (SRECF1).

O programa SRECF1 permite a simulação dinâmica de redes de caminhos de ferro electrificadas com indicação instantânea de posição e velocidade dos comboios, da tensão nos vários nós da rede eléctrica, etc.

O utilizador deverá incluir rotinas destinadas à representação das características das locomotivas e fornecer os dados que descrevem as características topológicas e eléctricas da rede e os esquemas de controle e protecção utilizadas.

Este manual divide-se nas seguintes secções fundamentais:

- 1- dados
- 2- resultados
- 3- apêndicas

#### 1- Dados

Os dados a fornecer podem classificar-se em:

- 1.1 características gerais da rede
- 1.2 dados relativos a alguns parâmetros de simulação

1.3 dados relativos à entrada de comboios na rede

1.4 características das locomotivas utilizadas.

O procedimento a seguir pelo utilizador deverá ser o seguinte (ver figura 1).

A - introduzir os dados 1.1 num subprograma BLOCKDATA contendo as variáveis respectivas em BLOCOS COMMON

B - introduzir os subprogramas FUNCTION (com nomes possíveis TRCT1, TRCT2, ..., TRCT9) destinadas a modelar as locomotivas

C - compilar o programa (ou apenas os subprogramas definidos em A e B se os outros subprogramas já estão compilados)

D - preparar os dados relativos a alguns parâmetros de simulação (tempos iniciais e finais, opções de impressão, etc.)

E - preparar os dados relativos à entrada de comboios na rede

F - correr o programa.

Observação: estará disponível brevemente um programa de preparação de dados que facilitará bastante o trabalho de preparação e codificação dos dados actualmente necessário.

### 1.1 Características gerais da rede

As características genéricas da rede são relativamente fixas para uma certa aplicação e estão incluídas num subprograma "BLOCKDATA" por forma a evitar a necessidade da sua inclusão repetida nos dados.

Com vista a evitar gastos excessivos de memória, parte dos dados estão incluídos em duas áreas de utilização:

IAREA(1000) contendo 1000 inteiros

RAREA(2000) contendo 2000 reais

englobadas num bloco "COMMON" de nome AREAS; para estas zonas existem diversos apontadores definindo o início e o fim de sub-áreas e indicando diversos valores actuais.

Na figura 2 mostra-se o esquema aconselhado para preenchimento das tabelas IAREAS e RAREA. Cada folha pode conter 200 valores das tabelas e 18 apontadores.

Por exemplo a posição de memória AREA (407) contém 3.3 e INIX(1) aponta para RAREA(418). Note-se que o preenchimento inicia-se na posição 1 e não na posição 0.

As características gerais da rede podem subdividir-se em:

1.1.1 parâmetros genéricos

1.1.2 características dos ramos (declives e velocidades máximas)

1.1.3 características eléctricas

1.1.4 programas de protecção

1.1.5 horários

1.1.6 filas de comboios

1.1.7 caminhos

#### 1.1.1 Parâmetros genéricos

Os parâmetros genéricos são os seguintes:

NEDCE: número de "ramos ferroviários"

NPATH: número de caminhos que se definem; os caminhos são definidos

posteriormente (1.1.7)

NTIMI: número de horários que se definem; os horários são definidos posteriormente (1.1.5)

PTHTBL(1), ..., PTHTBL(NTIMI): caminho associado a cada um dos horários; cada horário tem associado um só caminho

LENGHT(1), ..., LENGHT(NEDGE): comprimento em metros de cada um dos "ramos ferroviários"

VLMIN: valor mínimo de velocidade abaixo da qual o comboio é considerado parado; o valor é expresso em m/s (exemplo: 0.2 m/s)

VLMAX: valor máximo da velocidade expresso em m/s (exemplo: 50 m/s) (um majorante)

HMIN: distância mínima de um comboio ao que o precede no mesmo ramo; valor expresso em metros (exemplo: 500 m)

DXMIN: distância mínima abaixo da qual não há incremento especial; valor em metros (exemplo: 1 m)

DEMIN: distância mínima ao longo da catenária para que dois nós eléctricos sejam considerados distintos; valor em metros (exemplo: 10 m)

IIN: número de leitura de dados na instrução READ

IOUT: número do canal de impressão de dados na instrução WRITE

TMIN: mínimo tempo necessário entre dois acontecimentos para haver incremento de estado (exceptua-se a impressão de resultados a qual força normalmente a actualização do estado)

DTNOM: intervalo de tempo nominal entre duas iterações sucessivas. O tempo

po entre duas iterações nunca excede DINOM nem é inferior a TMIN; os instantes em que há impressão de resultados são independentes de DINOM e TMIN (ver 1.2).

### 1.1.2 Características dos ramos

#### Declives dos ramos

A cada ramo ferroviário está associada uma função declive ( $x$ ) sendo

$$0 \leq x \leq \text{LENGHT}(I)$$

Esta função está modelada como um conjunto de troços de declive constante que estão representados em RAREA.

O formato está representado na figura 3 (para cada ramo  $I$ ,  $1 \leq I \leq \text{NEDGE}$ ).

—  $X_0$  deve ser nulo e  $X_N$  deve ser igual a  $\text{LENGHT}(I)$

— os valores  $X_0, X_1, \dots, X_N$  estão expressos em metros

— os valores  $G_0, G_1, \dots, G_{N-1}$  estão expressos em  $\text{m/s}^2$ , sendo a correspondência:

$$1 \text{ parte por mil} = 0.0098 \text{ m/s}^2$$

—  $\text{GRST}(1), \text{GRST}(2), \dots, \text{GRST}(\text{NEDGE})$  são apontadores para RAREA para o início ( $X_0$ ) dos declives do ramo respectivo

—  $\text{GREND}(1), \text{GREND}(2), \dots, \text{GREND}(\text{NEDGE})$  são apontadores para RAREA para o fim ( $X_N$ ) dos declives do ramo respectivo.

Note-se que, por exemplo, uma via dupla é modelada como dois ramos ferroviários independentes, devendo-se por isso fornecer dois conjuntos de dados (declives, etc.) separados. Todavia, em ramos paralelos  $I, J$  e com o mesmo sen-

tido é possível (e aconselhável) utilizar os mesmos declives nos ramos fazendo  $GRST(J) = GRST(I)$  e  $GREND(J) = GREND(I)$ .

### Velocidades máximas

A representação das velocidades máximas é análoga à dos declives; o formato (para cada ramo I) está representado na figura 4.

—  $X_0, X_1, \dots, X_N$  estão expressos em metros, sendo  $X_0 = 0$  m,  
 $X_N = LENGHT(I)$

—  $V_0, V_1, \dots, V_N$  estão expressos em m/s

—  $SPLST(1), \dots, SPLST(NEDGE)$  são apontadores para a área RAREA para o início ( $X_0$ ) das velocidades máximas dos ramos respectivos

—  $SPLEND(1), \dots, SPLEND(NEDGE)$  são apontadores para RAREA definindo o fim ( $X_N$ ) da descrição das velocidades máximas do ramo respectivo.

As observações feitas atrás para os declives são também válidas aqui.

### 1.1.3 Características Eléctricas

O sistema poderá incluir uma ou mais secções eléctricas cada uma das quais inclui (pelo menos) um ponto de alimentação.

As variáveis a fornecer como dados, são:

EST - tensão nominal de funcionamento (em Volt, por exemplo, 25000 V)

NFEED - número de nós alimentadores da rede (1 no caso mais usual)

NFIX - número total de nós fixos, incluindo os nós alimentadores, nós de ligação entre ramos e junções transversais

KR, KI - parte real e imaginária das admitâncias equivalentes dos comboios quando parados (consumos auxiliares); valores em  $\Omega^{-1}$

YSPR(I), YSPI(I)  $1 \leq I \leq \text{NFEED}$ : parte real e imaginária das admitâncias internas vistas para montante dos pontos de alimentação; valores em  $\Omega^{-1}$

ISPR(I), ISPI(I)  $1 \leq I \leq \text{NFEED}$ : parte real e imaginária das correntes de curto circuito nos pontos de alimentação das catenárias; valores em Ampere.

Observação: YSPR(I), YSPI(I), ISPR(I), ISPI(I) são calculados a partir das impedâncias internas dos transformadores das subestações e das linhas alimentadoras.

Se há apenas uma alimentação (NFEED = 1) o argumento das correntes de curto circuito é arbitrário, devendo todavia ser escolhido por forma a que: tensão em circuito aberto =  $(\text{ISPR}(I) + j \text{ISPI}(I)) / (\text{YSPR}(I) + j \text{YSPI}(I))$  seja real e positiva; esta tensão será, em módulo, (normalmente) igual a EST (tensão nominal).

### Características das linhas eléctricas

Para cada ramo ferroviário devem ser fornecidas as características eléctricas da catenária respectiva. Esses dados são dados na forma descrita na figura 5.

O significado destes dados é o seguinte:

para cada ramo  $i$ ,  $1 \leq i \leq \text{NEDGE}$ , sendo  $K_i+1$  o número de nós eléctricos no ramo  $i$  e para cada  $j$ ,  $0 \leq j < K_i$ :

— o nó  $N_j$  está à distância  $X_j$  da origem do ramo  $i$

— a impedância quilométrica da catenária entre  $X_j$  e  $X_{j+1}$  no ramo  $i$  é  $ZR_j + ZI_j \ \Omega / \text{km}$

— os valores  $X_j$  devem ser expressos em metros e os valores  $ZR_j$ ,  $ZI_j$  em  $\Omega / \text{km}$ ;  $X_0$  deve ser nulo e  $X_N = \text{LENGHT}(I)$

— os números dos nós ( $N_j$ ) devem ser inteiros compreendidos entre 1 e  $\text{NFIX}$ ; todavia eles são armazenados como reais

—  $\text{ELST}(1), \dots, \text{ELST}(\text{NEDGE})$  são apontadores para o início da zona do RAREA que descreve as características das linhas eléctricas nos ramos respectivos (apontam para  $X_0$ )

—  $\text{ELEND}(1), \dots, \text{ELEND}(\text{NEDGE})$  são apontadores para o final da zona do RAREA que descreve as características das linhas eléctricas (apontam para  $N_{i1}$ )

Observação: deve haver apenas uma linha eléctrica por cada ramo ferroviário; todavia, diferentes ramos (paralelos e do mesmo sentido) podem partilhar a mesma área de RAREA (igualando os respectivos apontadores ELST e ELEND).

#### 1.1.4 Programas de protecção

A cada ponto de um ramo ferroviário está normalmente associado um programa de protecção com vista a estabelecer as necessárias condições de protecção. Neste manual vamos descrever a linguagem utilizada nos programas de protecção por forma a permitir ao utilizador escrever os programas de protecção,

apropriados às suas aplicações.

Os programas de protecção residem em IAREA, sendo referenciados por apontadores para o seu início.

Os programas de protecção associados aos vários pontos dos ramos estão descritos em RAREA.

A situação está descrita na figura 6.

Na figura 6  $P_0, P_1, \dots, P_{N-1}$  são apontadores para programas de protecção ou podem ter os seguintes valores especiais:

0 (NO) - significando nunca haver autorização para avançar na zona respectiva

1 (GO) - significando haver sempre autorização para avançar na zona respectiva.

$P_1$  aponta para o programa que é executado por um comboio que se encontra entre  $X_j$  e  $X_{j+1}$  no ramo  $i$ .

Os valores de  $X_j$  devem ser dados em metros.

A estrutura de IAREA está representada na figura 7.

IAREA tem no seu início  $K$  ( $\geq 1$ ) posições reservadas para as variáveis utilizadas pelos programas de protecção que designaremos por  $N_1, N_2, \dots, N_K$ .

Cada programa de protecção é um conjunto de instruções de protecção.

Cada instrução de protecção pode ser:

(1) uma instrução normal

(2) uma instrução de fim, cujo código é 10000, ocupando apenas uma posição de IAREA e que deve ser a última instrução de cada programa de protecção.

Cada instrução normal tem a seguinte estrutura:

- 1) apontador 1
- 2) apontador 2
- 3) apontador 3
- 4) apontador 4
- 5) caminhos aplicáveis
- 6) condição
- 7) acções se a condição é verdadeira
- 8) acções se a condição é falsa.

Os quatro apontadores são assim definidos:

apontador 1: aponta para o início da zona "condição"

apontador 2: aponta para o início da zona "acções se a condição é verdadeira"

apontador 3: aponta para o início da zona "acções se a condição é falsa"

apontador 4: aponta para o início da instrução seguinte

#### Zona dos caminhos aplicáveis

A instrução de protecção só é executada se ao comboio respectivo está associado um dos caminhos indicados nesta zona (ver 1.1.7).

Esta zona pode conter:

(1) uma posição por cada caminho aplicável

ou (2) o valor -1, indicando que a instrução é aplicável a qualquer caminho (que passe por esse ramo).

### Zona de condição

A condição que estabelece o conjunto de acções a serem executadas é fixada nesta zona. Os códigos aplicáveis são os seguintes:

código 1001: é feito o teste de distância mínima do comboio em questão aos outros comboios no mesmo ramo; se essa distância não for garantida as "acções se a condição for falsa" são executadas; se não a análise da condição prossegue

código 1002: ao encontrar este código a condição toma o valor "falso", sendo imediatamente executadas as "acções se a condição é falsa"

código 1003: ao encontrar este código a condição toma o valor "verdade" sendo imediatamente executadas as acções respectivas

código  $\alpha$ ,  $1 \leq \alpha \leq K$ ; se  $N_\alpha = 0$  a análise da condição prossegue; se não a condição toma o valor "falso" sendo imediatamente executadas as acções respectivas.

Se a análise da condição chega ao fim (último código) são executadas as "acções se a condição é verdadeira".

### "Acções se a condição é verdadeira"

Estas acções são especificadas por um conjunto de códigos que são os seguintes:

código 1005: o programa do comboio em questão passa a ser o número 1 (GO) até que um novo ponto de protecção no ramo seja atingido; isso é são eli-

minadas as condições de protecção para este comboio (entre  $X_j$  e  $X_{j+1}$ )

código 1006: o programa do comboio em questão passa a ser o número 0 (NO) até que um novo ponto de protecção seja atingido

código 1008: o programa de protecção termina imediatamente com o valor TRUE (valor por defeito nas "acções se a condição é verdadeira")

código 1009: o programa de protecção termina imediatamente com o valor FALSE (valor por defeito nas "acções se a condição é falsa": ver a seguir)

código  $\alpha$ ,  $1 \leq \alpha \leq K$ : a variável  $N_\alpha$  é incrementada de uma unidade

código  $-\alpha$ ,  $1 \leq \alpha \leq K$ : a variável  $N_\alpha$  é decrementada de uma unidade.

"Acções se a condição é falsa"

Os códigos são exactamente os mesmos que no caso anterior.

Nota: se os códigos 1008 ou 1009 não aparecerem nas acções o programa continua com a instrução seguinte.

Um exemplo de um programa de protecção está representado na figura 8.

#### Observações

— Qualquer das zonas definidas pode ser vazia.

— Se não for incluído o código 1005 o mesmo programa de protecção será repetidamente executado pelo mesmo comboio (o que não é normalmente o objectivo pretendido).

— Quando o programa de preparação de dados estiver disponível os programas de protecção serão escritos numa linguagem apropriada (PROTLANG) e tra-

duzidos de forma automática.

### 1.1.5 Horários

O número de horários é  $NTIMI$ , e cada horário é constituído por um conjunto de instruções de controle residentes em RAREA. Na figura 9:

— TABLE (I)  $1 \leq I \leq NTIMI$ : é um apontador que define o início da descrição do horário I em RAREA

—  $I_1, I_2, \dots, I_N$  são as instruções de controle que constituem o horário I; cada instrução de controle é constituída por um trio de valores conforme se especifica a seguir:

#### Instruções de controle

Codificação	Significado
A - $(X_0, 3, T_0)$	Para em $X_0$ no tempo $T_0$
B - $(X_0, 4, T_0)$	Para em $X_0$ no tempo $T_0$ e é passivado (abandona temporariamente a linha)
C - $(-, 5, -)$	Fim de percurso; abandona definitivamente a rede
D - $(-, 6, T_0)$	O comboio arranca no instante $T_0$ ; só possível depois de uma instrução A
E - $(P, 7, T_0)$	Activação no instante $T_0$ e execução do programa de protecção apontado por P; se o resultado for "verdade" o comboio arranca; se não continua passivado, executando de novo a instrução "TTRY se-

gundos" depois. (sõ possível depois de uma instrução B)

- F -  $(-, 2, M)$  ————— A massa do comboio respectivo passa a ser M; sõ possível depois de uma instrução B e antes da instrução E respectiva ou depois de uma instrução A e antes da instrução D respectiva
- G -  $(X'_0, 9, I)$  ————— O comboio respectivo passa o ramo I ã distância  $X_0$  da sua origem; sõ possível após uma instrução B e antes da instrução E respectiva
- H -  $(X_0, 10, T_0)$  ————— Passa por  $X_0$  no instante  $T_0$  com regulação "contínua"
- I -  $(X_0, 11, V_0)$  ————— Passa por  $X_0$  ã velocidade  $V_0$ , utilizando uma aceleração constante
- J -  $(X_0, 12, V_0)$  ————— Fixa a velocidade em  $V_0$  a partir da posição  $X_0$
- K -  $(X_0, 13, T_0)$  ————— Passa por  $X_0$  no instante  $T_0$  com a velocidade necessária pré-calculada inicialmente

### Observações importantes

#### 1- Unidades

As distâncias  $(X_0, X'_0)$  são dadas em metros; as velocidades  $(V_0)$  são dadas em metros/segundo; os tempos  $(T_0)$  são dados em segundos; a massa  $(M)$  é dada em quilogramas.

## 2- Tempos

Todos os tempos ( $T_0$ ) são relativos ao instante da entrada do comboio no sistema, isto é admite-se o tempo inicial de zero segundos para cada horário.

## 3- Distâncias

Todas as distâncias  $X_0$  são relativas ao início do caminho associado ao horário; é possível, contudo, um horário ser relativo a apenas uma parte do caminho respectivo, continuando as distâncias a ser relativas ao início do caminho.

Excepção: a distância  $X_0'$  da instrução G é relativa ao início do ramo I.

## 4- Códigos e ramos

— Todos os códigos são inteiros residindo todavia numa área de reais (RAREA); por isso devem obedecer à sintaxe dos reais; o mesmo se passa para a representação dos ramos (I).

— Existem códigos correspondentes a outros acontecimentos distintos das instruções de controle; por isso os números de código indicados não são consecutivos.

Na figura 10 pode observar-se um exemplo de código de um programa de controle (horário).

Os horários devem ser pré-fixados atendendo a várias circunstâncias

tais como o tipo de composições, a existência de limites de velocidade, etc.

#### 1.1.6 Filas de comboios

Para cada ramo existe uma parte de IAREA destinada a conter os números internos dos comboios presentes nesse ramo. Esta estrutura de fila constitui o método principal de acesso do programa aos vários comboios (figura 11).

START(I) - aponta para a primeira posição da zona de IAREA destinada à representação da fila de comboios no ramo I.

TEND(I) - aponta para a última posição da zona de IAREA destinada à representação da fila de comboios no ramo I.

Estas posições devem ser enchidas inicialmente com zeros.

O número máximo de comboios no ramo I é

$$TEND(I) - START(I) \quad 1 \leq I \leq NEDGE$$

(sendo portanto igual ao número de posições da área respectiva -1)

As filas de comboios formam uma "estrutura circular" na área respectiva.

#### 1.1.7 Caminhos

Cada caminho é uma sequência de "ramos ferroviários" seguida de 0 e residentes em IAREA (figura 12).

Na figura 12:

PATH(I) - é um apontador para IAREA definindo o início da descrição do

caminho I ( $1 \leq I \leq \text{NPATH}$ ).

Todos os ramos devem satisfazer:

$$1 \leq \text{IAREA}(\text{PATH}(I)+K) \leq \text{NEDGE}$$

para  $0 \leq K < \text{número de ramos do caminho I}$ .

$\text{PHTBL}(I)$  - define para cada horário I ( $1 \leq I \leq \text{NTIMI}$ ) o correspondente caminho, sendo pois

$$1 \leq \text{PHTBL}(I) \leq \text{NPATH}$$

## 1.2 Dados relativos a alguns parâmetros de simulação

Alguns dos parâmetros de simulação podem ser modificados frequentemente e, por isso, são dados em cartões lidos pelo programa.

Esses parâmetros são:

TINIT: tempo inicial da simulação em segundos;

TFIN: tempo final da simulação;

DTPRT: intervalo de tempo entre duas impressões de resultados;

I1: impressão de resultados em todas as iterações;

I2: impressão dos acontecimentos do tipo H;

I3: impressão de resultados nos acontecimentos do tipo H;

I4: impressão dos acontecimentos do tipo S;

I5: impressão de resultados nos acontecimentos do tipo S;

I6: impressão de informação relativa à convergência do método de solu-

ção;

I7: impressão dos dados relativos aos comboios que entram na rede;

I8: impressão inicial de todos os dados relativos à rede.

As variáveis I1 e I8 devem ter o valor

1: se se pretende impressão

0: se não se pretende impressão

Os valores normalmente aconselhados são:

I1=0, I2=1, I3=0, I4=1, I5=0, I6=0, I7=1, I8=1

Os formatos são os seguintes:

CARTÃO 1

TINIT	TFIN	DTPRT	variável
F10.3	F10.3	F10.3	formato

CARTÃO 2

I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	variável
I2	formato							

### 1.3 Dados relativos à entrada dos comboios no sistema

Por cada comboio que entra no sistema devem ser dados três cartões com a seguinte informação:

EXTNUM - número externo do comboio; pode ser qualquer inteiro de não

mais de 4 dígitos; é este número que identifica externamente o comboio.

TENT - é o instante em que o comboio entra no sistema

TANT - é o tempo que decorreu desde o início da viagem do comboio até ao instante em que é iniciada a sua simulação.

A base dos tempos para este comboio é pois  $TENT - TANT$ .

Normalmente, se  $TENT > TINIT$  então  $TANT=0$ , isto é, um comboio que entra após o início da simulação efectua o seu percurso desde o princípio. Se  $TENT=0$ ,  $TANT$  pode ser não nulo, significando que o comboio já tinha começado a viagem quando é iniciada a simulação.

Os formatos são os seguintes:

TTYE(TR) - é um inteiro de 1 a 9 indicando uma das rotinas (de TRCT1 a TRCT9) correspondente às características de tracção do comboio.

PTHTR(TR) - é um inteiro satisfazendo

$$1 \leq PTHTR(TR) \leq NPATH$$

que indica o caminho a ser seguido pelo comboio.

IT - é um inteiro satisfazendo

$$1 \leq IT \leq NTIMI$$

que indica o horário relativo ao comboio; este horário deve ter como caminho correspondente  $PTHTR(TR)$ :

$$PTHBL(IT) = PTHTR(TR)$$

XTR - é a posição em km do comboio ao longo do caminho quando inicia o seu percurso (depende do horário e de  $TANT$ ).

VLTR - é a velocidade em km/h do comboio quando inicia o seu percurso.

ACCTR - é a aceleração em  $m/s^2$  do comboio quando inicia o seu percurso; usualmente é nula.

MASSTR - é a massa em toneladas do comboio; poderá ser modificada por instruções do horário (código 5).

IS - é o estado do comboio quando inicia o seu percurso podendo ter inicialmente os valores:

IS = 1 em andamento ou parado mas activado

IS = 3 parado e fora da rede

Formato dos dados:

Para cada comboio:

CARTÃO 1

EXTNUM(TR)	TENT seg	TANT seg
I5	F10.2	F10.2

CARTÃO 2

TTYPE(TR)	PTHTR(TR)	IT
I5	I5	I5

## CARTÃO 3

XTR km	VLTR km/h	ACCTR m/s <sup>2</sup>	MASSTR ton	IS
F10.2	F10.2	F10.2	F10.2	I5

No fim de todos os comboios, deve ser colocado um cartão do tipo 1 com EXTNUM negativo e TENT = TANT = 0.0.

#### 1.4 Características das locomotivas utilizadas

O utilizador deverá construir uma rotina do tipo FUNCTION para cada tipo de locomotiva que pretende simular. Essas rotinas devem ter os seguintes nomes:

TRCT1, TRCT2, ..., TRCT6 :            locomotivas eléctricas  
 TRCT7, TRCT8, TRCT9 :            locomotivas não eléctricas

Estes subprogramas devem ser encabeçados por

```
REAL FUNCTION TRCT <N> (IC, ITR, FTQ)
```

em que <N> pode ser 1, 2, ..., 9, e em que:

IC - é o código da função a executar pela rotina

ITR - é o número interno do comboio em questão

FTQ - é um valor real dependente do código IC.

Devem incluir os seguintes blocos COMMON: LEVEL1, TRAIN, ELECTR.

A função a executar depende de IC da seguinte forma:

IC = 1: FTQ é o valor da força de tracção pretendida expressa em Newton.

A rotina deverá, de acordo com as limitações das características da locomotiva, encontrar o valor admissível da força o mais próximo possível de FTQ e atribuir esse valor a TRCT <N> . Essas limitações são, entre outras, as seguintes:

- (1) máxima força de travagem
- (2) máxima variação de força de tracção por unidade de tempo
- (3) máximo esforço de tracção à velocidade em questão

Note-se que FTQ pode ter qualquer valor na chamada, sendo necessário cuidado para garantir o bom funcionamento da rotina no caso geral. Esta rotina deverá atribuir 0 a MODE(ITR).

IC = 2: FTQ é a força de tracção pretendida que é, neste caso, próximo dos valores possíveis. A rotina deverá usar as características de tracção da locomotiva para calcular:

MODE(ITR): um inteiro positivo descrevendo (de acordo com uma codificação feita pelo utilizador) o tipo de andamento (travagem, ponto do graduador, etc.).

TRCT <N> : o resultado da rotina é a força de tracção real nas condições actuais.

YSPR(IE): a admitância real (em  $\Omega^{-1}$ ) do comboio vista do pantógrafo nas condições actuais (só para os comboios eléctricos).

YSPI(IE): a admitância imaginária (em  $\Omega^{-1}$ ) do comboio vista do pantógrafo nas condições actuais (só para os comboios eléctricos).

IC = 3: TRCT <N> é a força de resistência ao andamento do comboio por unidade de massa expressa em N/kg; FTQ não é usado.

IC = 4: TRCT <N> é o limite de aderência do comboio expresso em Newton; FTQ não é usado.

IC = 5: TRCT <N> é a desaceleração nominal de travagem nas condições actuais; FTQ não é usado.

Para construir estas rotinas o utilizador dispõe (através dos blocos COMMON) das seguintes variáveis de interesse como dados:

VL(ITR) - velocidade actual do comboio em m/s;

FT(ITR) - força de tracção no instante de discretização anterior;

DT - intervalo de discretização actual (em segundos);

ENUMB(ITR) - número do n.º eléctrico correspondente ao comboio;

ER(IE) - parte real da tensão no pantógrafo (IE=ENUMB(ITR));

EI(IE) - parte imaginária da tensão no pantógrafo (IE=ENUMB(ITR));

STATE(ITR) - estado do comboio (1: em andamento; 2: parado mas na rede);

MASS(ITR) - massa do comboio em kg;

EST - tensão nominal da rede eléctrica.

Nota: por cada novo tipo de locomotiva introduzido deve alterar-se o subprograma READDT por forma a definir correctamente os tipos legais de comboios (erro 100).

## 2- Resultados

Os resultados obtidos podem dividir-se nos seguintes grupos:

- descrição geral da rede
- estado do sistema
- mensagens diversas

### 2.1 Descrição geral da rede

Quando a variável  $I8 = 1$  (ver 1.2) o programa começa por imprimir uma descrição geral da rede, incluindo:

- opções de impressão de resultados
- tempos de simulação
- limites de velocidade e deslocamento
- comprimento dos ramos
- número máximo de comboios em cada ramo
- declives nos ramos
- velocidades máximas nos ramos
- pontos de protecção e código dos programas de protecção
- características eléctricas gerais
- características das linhas eléctricas nos ramos
- código dos programas de controle (horários)
- descrição dos caminhos

MD: modo de andamento (MODE(TR))

P(kW): potência activa absorvida

VMOD(V): tensão no pantógrafo

ARG(rad): argumento da tensão em radianos

CURR(A): corrente absorvida

### 2.2.3 Potências e energias globais

São escritos os valores de:

POWER-IN: potência total injectada pelos nós alimentadores (kW)

TRPOWER: potência absorvida pelos comboios (kW)

P-LOSS: potência de perdas (kW) nas linhas

ENERGY IN: energia total dispendida desde o início da simulação (kW h)

ENG. LOSS: energia total de perdas nas linhas (kW h)

## 2.3 Mensagens diversas

O programa pode fornecer durante a execução diversas mensagens, nomeadamente:

### 2.3.1 Acontecimentos do tipo S

Quando se verifica um acontecimento deste tipo e I4=1 (ver 1.2) é impressa uma mensagem apropriada; estes acontecimentos podem ser:

- um comboio aproxima-se excessivamente do que o precede;
- é excedido um limite local de velocidade;
- é excedido o limite de aderência;
- não é permitido o acesso a uma zona protegida.

### 2.3.2 Acontecimentos do tipo H

Quando se verifica um acontecimento deste tipo e  $I2=1$  (ver 1.2) é impressa uma mensagem apropriada; estes acontecimentos podem ser:

- um comboio para;
- um comboio para e é passivado;
- um comboio abandona a rede;
- um comboio arranca;
- um comboio é activado e arranca;
- um comboio entra na rede.

### 2.3.3 Comboios que entram na rede

Quando um comboio entra inicialmente na rede e  $I7=1$  (ver 1.2) são impressas as principais características desse comboio, nomeadamente o tipo do comboio, o caminho, o horário, o ramo em que se encontra, a posição dentro do ramo, a massa, a velocidade inicial e o estado.

#### 2.3.4 Mensagens de erro

Em determinadas circunstâncias podem ocorrer erros durante a execução do programa. Em alguns casos o programa termina e noutros continua. Os erros podem ter as seguintes origens:

- dados fornecidos errados ou fora dos limites admissíveis
- "overflow" de certas tabelas
- dificuldades na convergência em métodos iterativos
- erros do programa ainda não detectados.

Encontra-se uma tabela dos erros num apêndice a este manual.

#### 2.3.5 Mensagem final

É impressa uma mensagem no fim da simulação.

#### 2.3.6 Informação de convergência

No caso de  $I6=1$  (ver 1.2) são impressos em cada instante de discretização temporal o número de iterações e o erro (em Volt) definido como a variação máxima de tensão relativamente à última iteração.

Manual de utilização

## Apêndice 1

TABELA DOS CÓDIGOS DOS ERROS

Nº	SUBPROGRAMA	RECUPERÁVEL	DESCRIÇÃO
10*	EVLIST	S	Lista dos acontecimentos vazia
11	EVLIST	N	Overflow na lista de acontecimentos
20	EXEVT	N	Uma instrução de código diferente de 5, 6 ou 2
21	EXEVT	N	Uma instrução de código diferente de 7, 5, 2 ou 9 segue-se a uma instrução de passivação (4)
22*	EXEVT	N	"Activação" com código diferente de 7
23*	EXEVT	N	"Partida" com código diferente de 6
24	EXEVT	N	Encontrado código igual a 5 durante o ajuste inicial das instruções de controle
25*	EXEVT	N	Ramo incorrecto ( $\leq 0$ ) apontado por REDGE
30	REGCNT	S	Código ilegal (diferente de 3, 4, 10, 11, 12 ou 13) de controle durante o andamento do comboio
40	SOLVE	S	Mais de 30 iterações durante a solução das equações estáticas

## Apêndice 1 (continuação)

Nº	SUBPROGRAMA	RECUPERÁVEL	DESCRIÇÃO
41	SOLVE	N	"Overflow" durante a simulação da bifactorização da matriz inversa das admitâncias (BSIMUL)
42	SOLVE	S	Erro durante a bifactorização da matriz inversa das admitâncias (BIFACT)
60	ELENET	N	Número de nós eléctricos excessivo
61	ELENET	N	Número de ramos eléctricos excessivo
70*	QUEUE	N	Tentativa de retirar o comboio à frente de uma fila vazia
71	QUEUE	N	Tentativa de colocar o comboio na parte traseira de uma fila cheia (overflow)
72	QUEUE	N	Tentativa de colocar o comboio numa fila cheia (overflow)
73*	QUEUE	N	Tentativa de retirar o comboio de uma fila vazia ou onde não se encontra
90	GETSP	N	O número total de comboios excede o número máximo admissível
100	READDT	S	Tipo de comboio ilegal (não implementado)
101	READDT	S	Número de caminho ilegal
102	READDT	S	Horário ilegal ou não concordante com o caminho

## Apêndice 1 (continuação)

Nº	SUBPROGRAMA	RECUPERÁVEL	DESCRIÇÃO
103	READDT	S	Posição indicada do comboio negativa
104	READDT	S	Velocidade inicial fora dos limites (0 a 250 m/s)
105	READDT	S	Aceleração inicial fora dos limites (-8 a 8 m/s <sup>2</sup> )
106	READDT	S	Estado inicial do comboio ilegal (di- ferente de 1 ou 3)
108	READDT	S	Massa indicada fora dos limites

Observação: os erros marcados com um asterisco não devem aparecer; a sua ocorrência significa um provável erro na lógica do programa.

Manual de utilização

## Apêndice 2

SUBPROGRAMAS1) Gerais

INIT: inicialização das estruturas de informação

Programa Principal: controle geral do programa

2) Leitura de dados

BLOCKDATA: dados genéricos da rede

RDNOTI: lê o número e tempo de entrada do próximo comboio

READDT: lê as características do comboio que entra

GETSP: procura espaço e número interno para um comboio que entra

3) Saída de dados

DTOUT: impressão dos dados descritivos das características gerais da rede

OUTST: impressão do estado actual do sistema

ERROR: impressão das mensagens de erro

MSSGSF: impressão das mensagens relativas aos acontecimentos do tipo S

MSSGH: impressão das mensagens relativas aos acontecimentos do tipo H

MSSGF: impressão da mensagem final

#### 4) Protecções

GETPRG: determina o programa de protecção associado a um determinado comboio

SUPROG: executa um programa de protecção (resultado TRUE ou FALSE)

EXESFT: executa os acontecimentos do tipo S

#### 5) Acontecimentos

EXEVT: executa os acontecimentos do tipo H

NXTEV: determina o próximo acontecimento do tipo H

EVLIST: executa as operações associadas à lista de acontecimentos do tipo H

#### 6) Controle

REGCNT: executa os comandos de controle que se encontram nas instruções do horário

ADTIMI: ajusta a instrução de horário (relativa à posição actual do comboio)

#### 7) Solução das equações

SOLVE: solução das equações estáticas (método iterativo)

ELENET: construção da rede eléctrica relativa à posição actual dos comboios

BPREPA: preparação dos dados para a bifactorização da matriz inversa das admitâncias

BSIMUL: simulação da bifactorização

BIFACT: bifactorização

BSOLVE: solução do sistema de equações  $I = Y E$  a partir de  $Y^{-1}$  bifactorizado

INCRM: actualização no estado do sistema (iteração temporal nas equações temporais)

### 8) Tracção

TRCT: chama a rotina de tracção relativa ao comboio

TRCT1, ..., TRCT5: rotinas de tracção para comboios eléctricos

TRCT6, ..., TRCT9: rotinas de tracção para comboios não eléctricos

### 9) Ramos e carinhos

TPATH: ajusta o ramo em que se encontra um comboio (a partir do seu caminho)

GRAD: determina o declive do terreno num certo ponto

SPLIM: determina a velocidade máxima num certo ponto

QUEUE: realiza os algoritmos associados à estrutura da fila de comboios num certo ramo

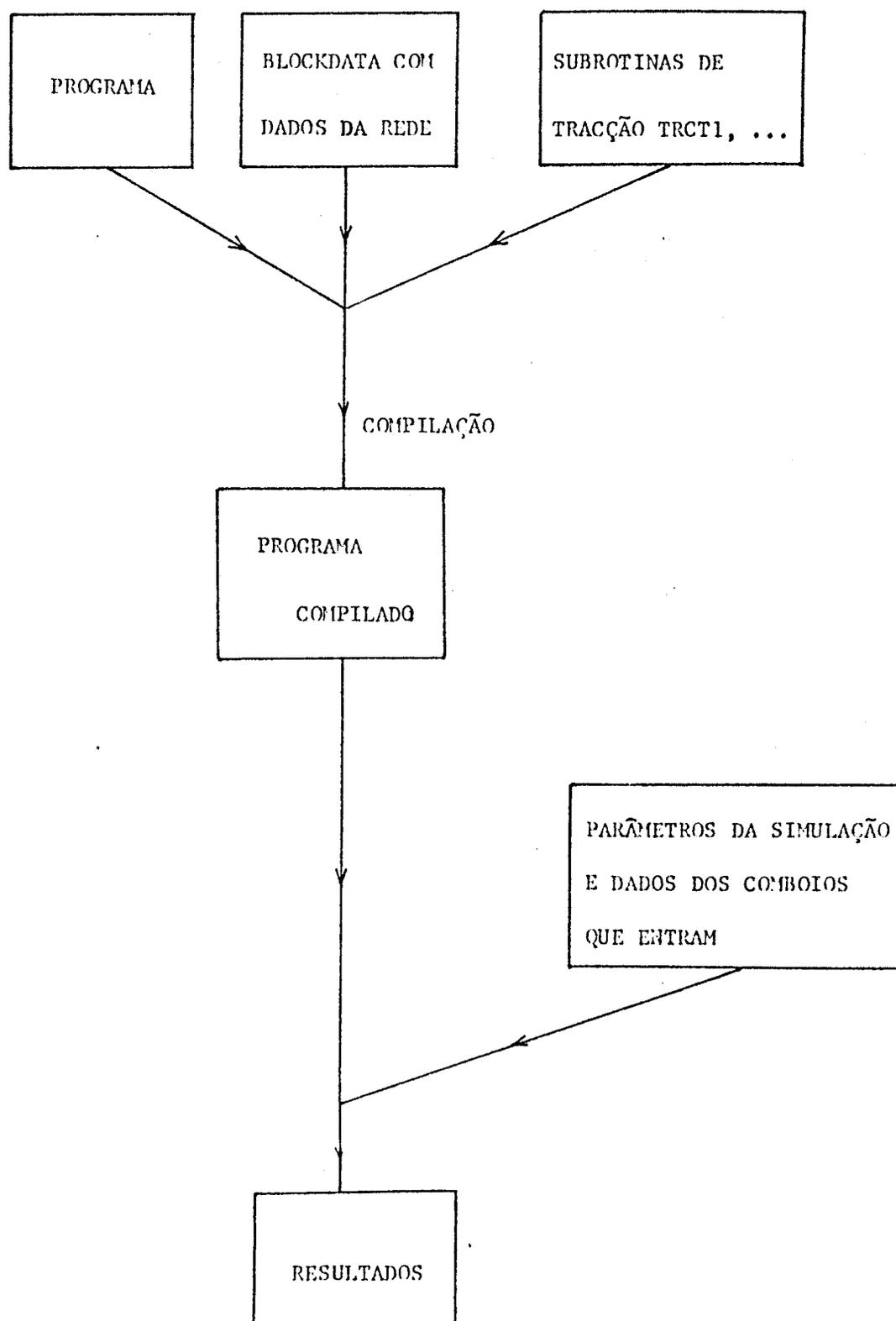


Fig. 1 Passos necessários para correr o programa.

ARRAY: AREA PÁGINA: 3

		3º DIGITO									
1º Dig.	2º Dig.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	0	1.2	1.6	2.1	0.3	-1.2	-2.12	0.05	3.3	4.6	5.7
4	1	6.31	5.18	4.82	4.45	4.03	3.82	2.21	2.32	2.14	2.02
4	2	2.31	----								
4	3										
4	4										
4	5										
4	6										
4	7										
4	8										
4	9										
5	0										
5	1										
5	2										
5	3										
5	4										
5	5										
5	6										
5	7										
5	8										
5	9										

APONTADORES

NOME	VALOR	NOME	VALOR	NOME	VALOR
P(1)	400				
P(2)	410				
INIX(1)	418				

Fig. 2 Folha para definição de IAREA e RAREA.

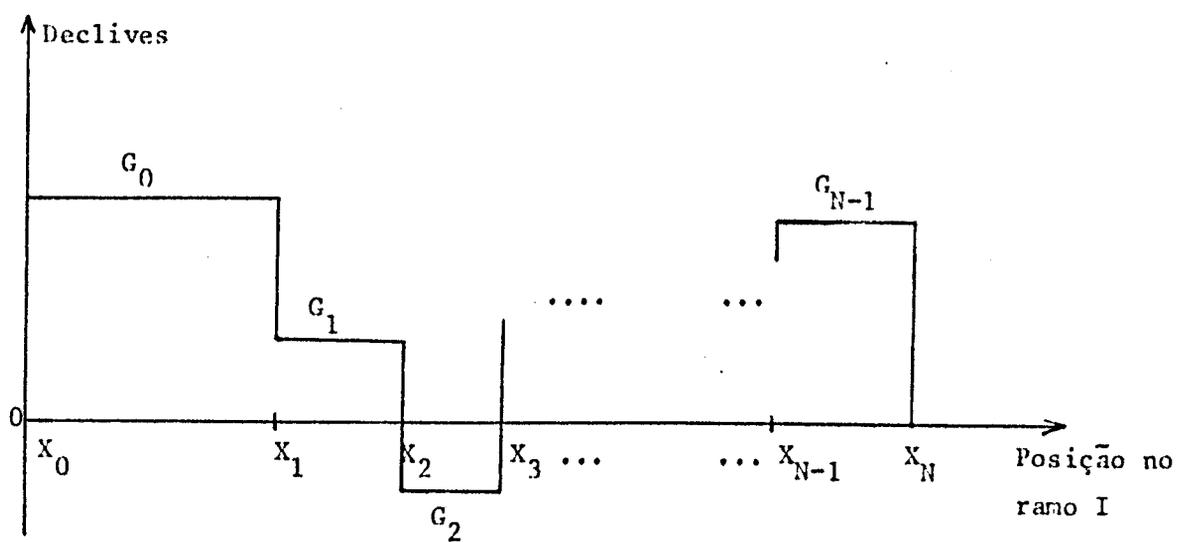
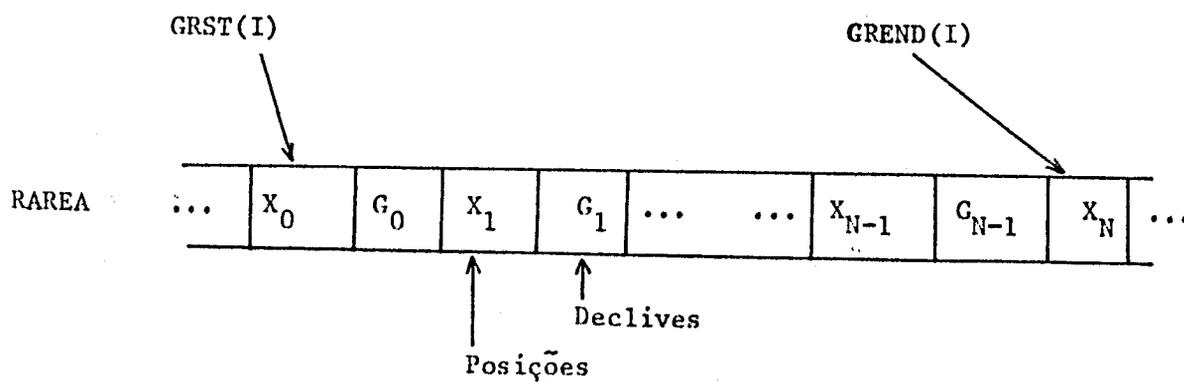


Fig. 3 Representação dos declives em RAREA.

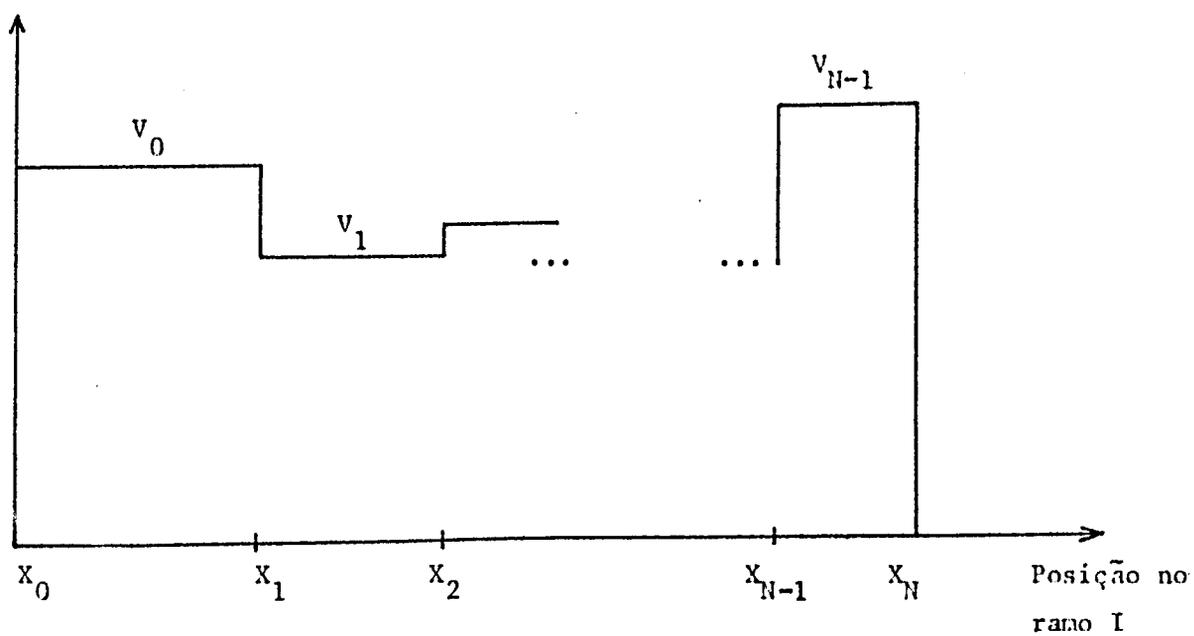
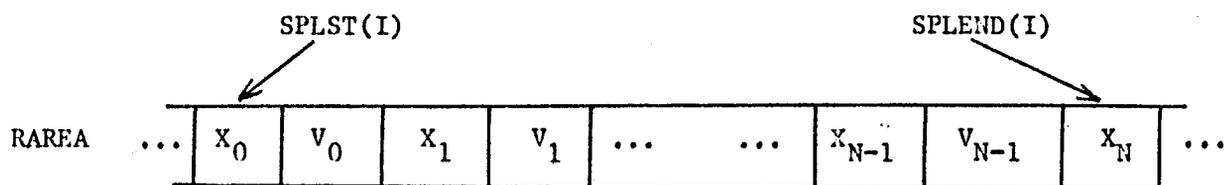


Fig. 4 Representação dos limites de velocidade em RAREA.

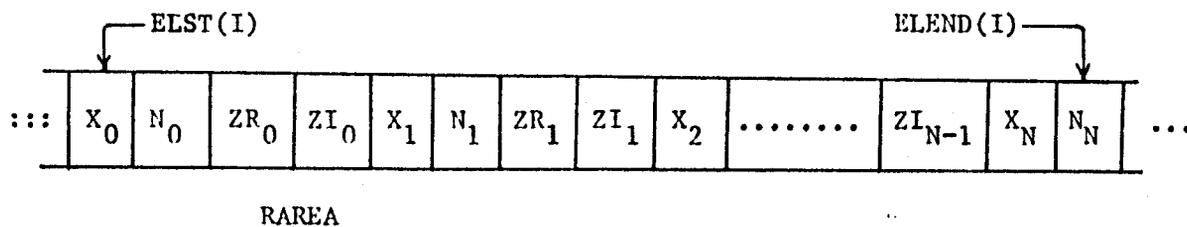


Fig. 5 Representação em RAREA dos nós eléctricos e das impedâncias quilométrica da catenária (no ramo I).

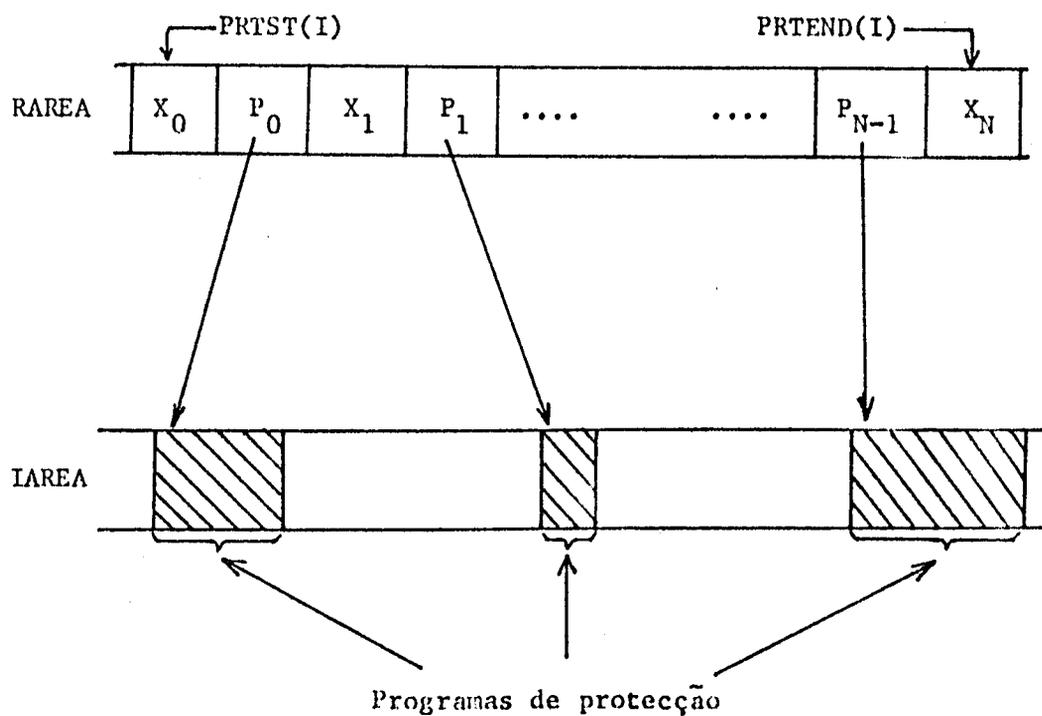


Fig. 6 Programas de protecção associados ao ramo I.

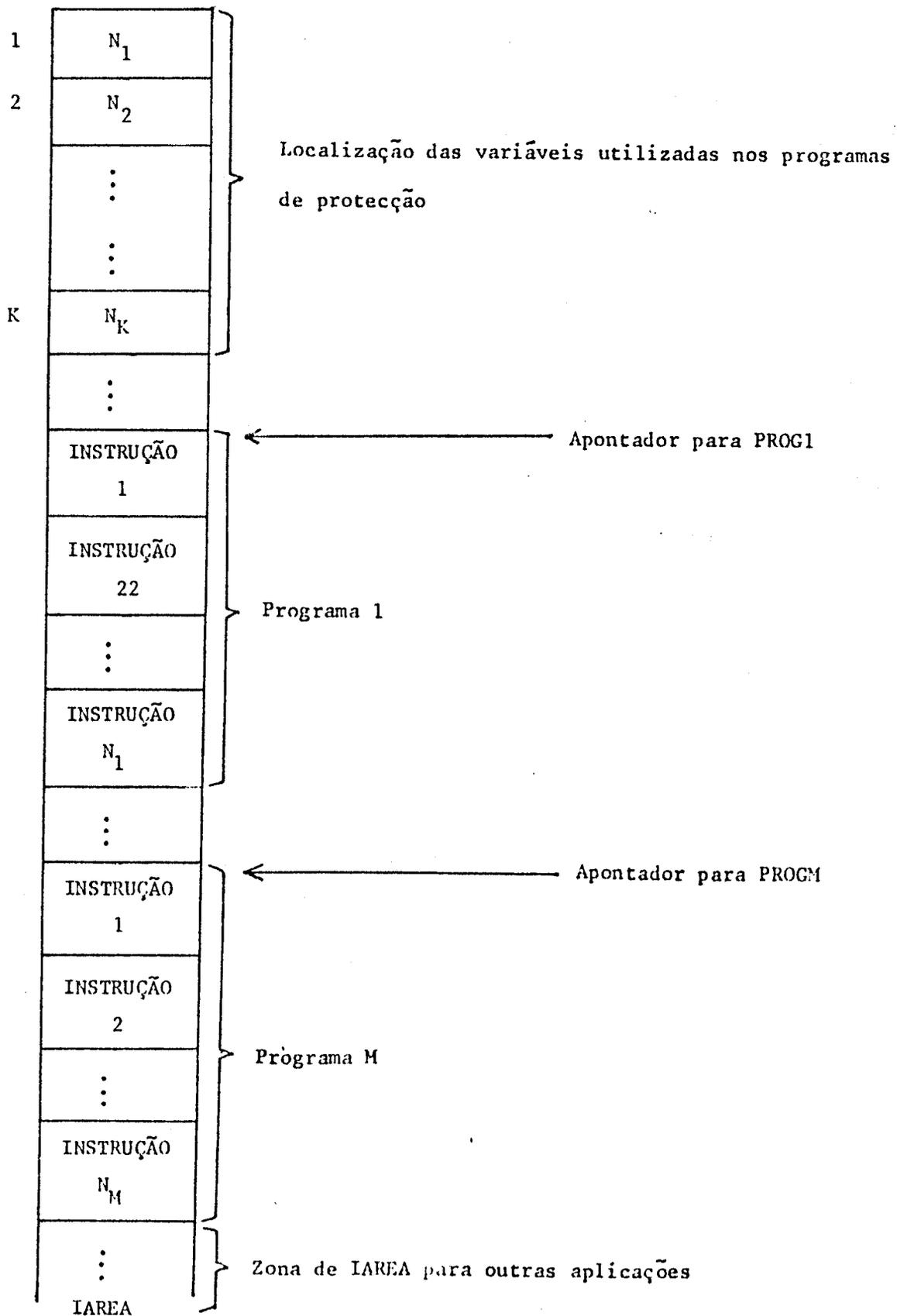


Fig. 7 Estrutura dos programas de protecção em IAREA.

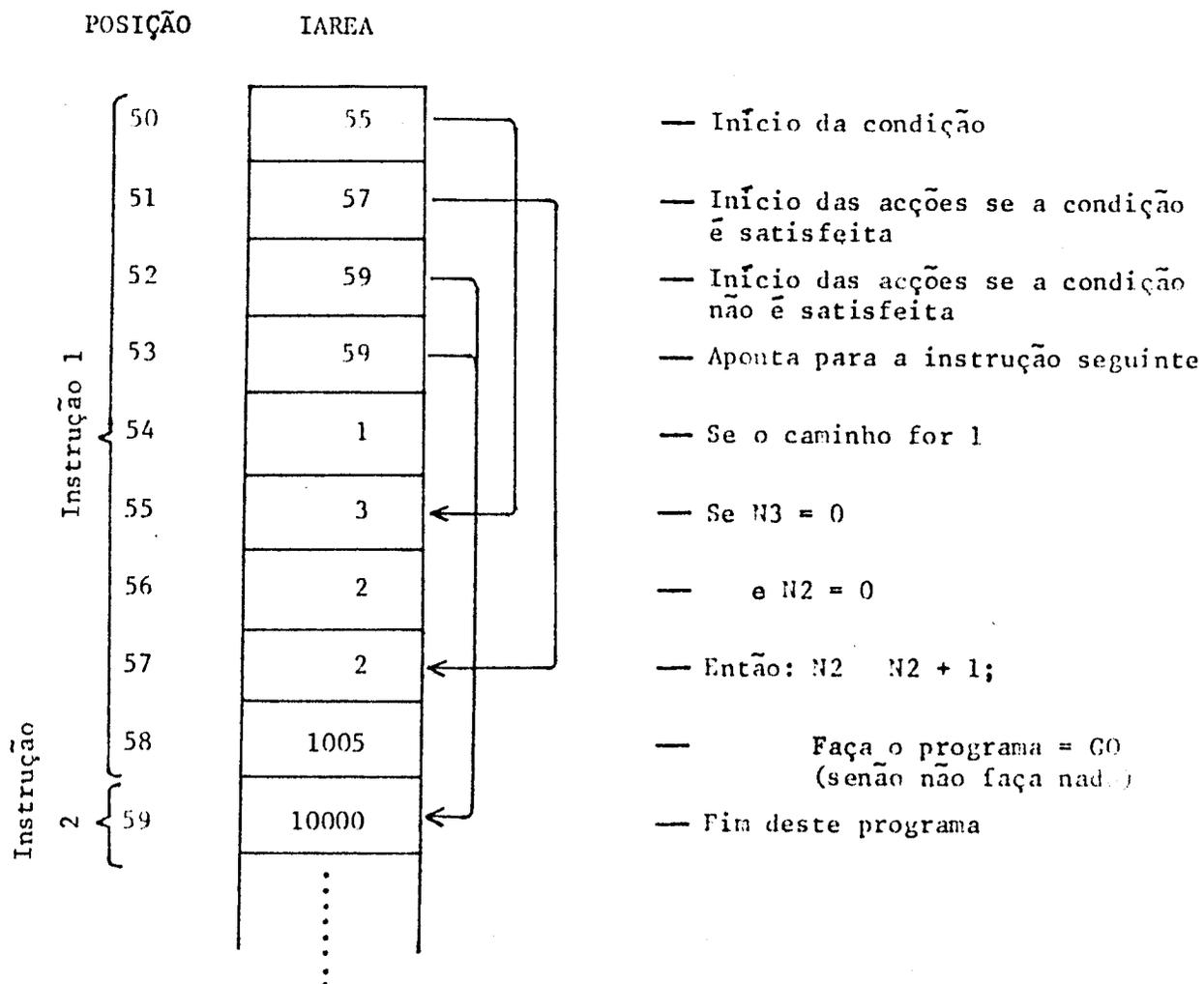


Fig. 8 Exemplo simples de um programa de protecção (este programa é referenciado pelo número 50).

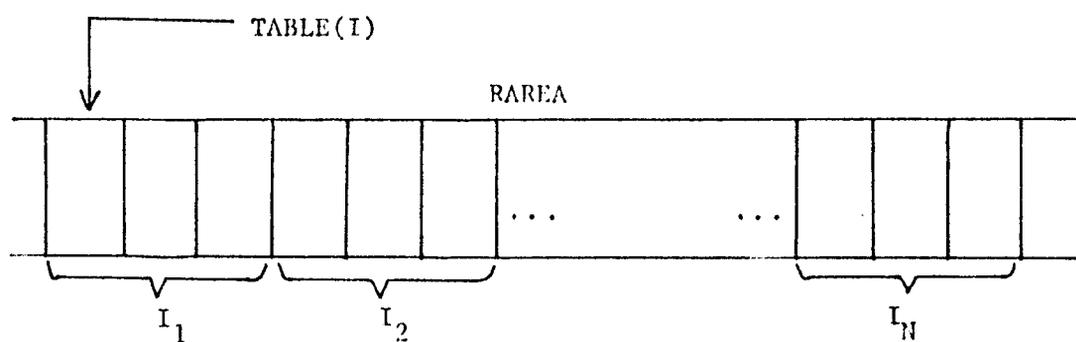


Fig. 9 Horários (ou programas de controle) em RAREA.

$I_1, I_2, \dots, I_N$ : instruções de controle

RAREA	
...	
200.	TABLE (I)
10.	
30.	
400.	Passa pelos 200 m aos 30 s
11.	
20.	
700.	Mantem a velocidade de 20 m/s até aos 400 m
3.	
90.	
0.	Para (mantendo-se na linha) aos 700 m no instante 90 s
6.	
150.	
3000.	Arranca no instante 150 s
10.	
350.	
0.	Passa pelos 3000 m aos 350 s
5.	
0.	
...	Abandona a rede
...	
...	

Fig. 10 Exemplo de um programa de controle.

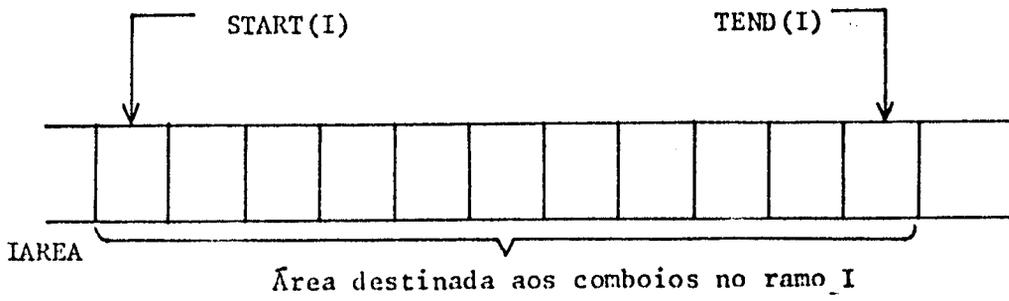


Fig. 11 Área em IAREA para a fila de comboios no ramo I.

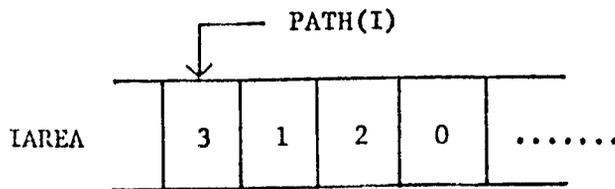


Fig. 12 Descrição de um caminho (ramo 3 - ramo 1 - ramo 2) em IAREA.

BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] CHANG - Digital Computer Simulation and Optimization of AC Railway Electrification; Phd Thesis, U.M.I.S.T., 1975.
- [ 2 ] GARREAU - La Traction Electrique; Riber, 1965.
- [ 3 ] ZEIGLER - Theory of Modelling and Simulation; John Wiley, 1976.
- [ 4 ] KNUTH - The Art of Computer Programming, Vol. 3; Addison-Wesley, 1973.
- [ 5 ] AHO, HOPCROFT, ULLMAN - The Design and Analysis of Computer Algorithms; Addison-Wesley, 1974.
- [ 6 ] MANNA - Mathematical Theory of Computation; McGraw-Hill, 1974.
- [ 7 ] VAUCHER, DUVAL - A Comparision of Simulation Event List Algorithms; CACM, Abril 1975, pag. 223-230.
- [ 8 ] GONNET - Heaps Applied to Event Driven Mechanisms; CACM, Julho 1976, pag. 417-418.
- [ 9 ] WYMAN - Improved Event-Scanning Mechanisms for Discrete Event Simulation; CACM, Junho 1975, pag. 350-353.
- [ 10 ] FRANTA, MALY - A Comparision of Heaps and the TL structure for the Simulation Event Set; CACM, Outubro 1978, pag. 873-875.
- [ 11 ] TINNEY, HART - Power Flow Solution by Newton's Method; IEEE, TPAS pag. 1449-1460, Novembro 1967.

- [12] STOTT, ALSAC - Fast Decoupled Load Flow; IEEE, TPAS, pag. 859-869, Maio, Junho 1974.
- [13] STOTT - Review of Load Flow Calculations Methods; Proceedings of the IEEE, Julho 1974.
- [14] VUSKOVIK, LUSICK - Methodology and Programming Package for Railway Traction Simulation - em "Traffic Control and Transportation Systems", North-Holland, 1974.
- [15] MEYER - La Fluidification du Trafic sur le Triangle de Gagny; Revue Générale des Chemins de Fer, Janeiro 1975.
- [16] KALRA - A Green Light for Advanced Train Controls; Spectrum of the IEEE, Fevereiro 1979.
- [17] TALUKDAR - Multiobjective Load Management Techniques for Electrified Transportation Systems; IEEE, TPAS, Nov/Dez 1979, pag. 2099-2106.
- [18] BELLMAN - Dynamic Programming; Princeton University Press, 1957.
- [19] ATHANS, FALB - Optimal Control; McGraw-Hill, 1966.
- [20] PONTRYAGIN, BOLTYANSKII, GAMKRELIDZE, MISHCHENKO - The Mathematical Theory of Optimal Processes; John Wiley, 1962.
- [21] MUFTI - Computational Methods in Optimal Control Problems; Springer-Verlag, 1970.
- [22] TOLLE - Optimization Methods; Springer-Verlag, 1975.

- [ 23 ] STROBEL, HORN, KOSEMUND - A Contribution to Optimal Computer-Aided Control of Train Operation - em Traffic Control and Transportation Systems; North-Holland, 1974.
- [ 24 ] MADNICK, DONOVAN - Operating Systems; McGraw-Hill, 1974.
- [ 25 ] FORD - Implementation of a Generalized Critical Region Construct; IEEE, TSE, Novembro 1978, pag. 449-455.
- [ 26 ] HORAIS, C. - A Economia Racional da Energia - Exemplo de um Pilão a Explorar; Electricidade, Nov/Dez 1979.
- [ 27 ] JENSEN, WIRTH - PASCAL, User Manual and Report; Springer-Verlag, 1975
- [ 28 ] ZOLENKOPF - Bi-factorization: basic computational algorithm and programming techniques - em Large Sparse Sets of Linear Equations, pags. 75-96; Academic Press, 1971
- [ 29 ] GLIMI - La dynamique de marche et la protection des véhicules sur rail soumis à une régulation linéaire; Rail International, Maio 1978, pag. 301-323
- [ 30 ] CONWAY, MAXWELL, MILLER - Theory of Scheduling; Addison-Wesley, 1967.

editorial engenharia  
f.e.u.p.



FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000005882

