

**DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO**

**CONTROLE DE  
SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS DE PRODUÇÃO  
BASEADO EM  
REDES DE PETRI INTERPRETADAS**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

**São Paulo  
1998**

**DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO**

**CONTROLE DE  
SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS DE PRODUÇÃO  
BASEADO EM  
REDES DE PETRI INTERPRETADAS**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica / Mecatrônica

Orientador:  
PAULO EIGI MIYAGI

**São Paulo  
1998**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010407

*“Quando tiveres terminado o teu trabalho, faz o do teu irmão, ajudando-o, por Cristo, com tal delicadeza e naturalidade, que nem mesmo o favorecido repare que estás fazendo mais do que em justiça deves.*

*Isso, sim, é fina virtude de filho de Deus!”*

**(Josemaría Escrivá)**

*A Edina como expressão do meu amor e carinho e a toda minha Família.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria que estas palavras de agradecimento refletissem algo mais que um simples formalismo, revelando o mais profundo conteúdo da palavra gratidão. Desta forma, estou grato a Deus pelo consentimento de mais esta oportunidade em minha vida.

Em relação ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi, obrigado por tudo que tem feito e pela pessoa ímpar que é em todos os sentidos, provando-me que a vida é um eterno aprendizado e que a humildade é um dos pilares fundamentais que sustentam a sabedoria.

Sou eternamente grato a minha esposa Edina pelo seu imensurável carinho e paciência em suportar a minha ausência em vários momentos nestes anos e pelas horas de sono que dedicou à revisão deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato pela confiança e apoio ao longo destes anos.

Sou grato a todos os colegas da Mecatrônica entre os quais o Eng. Wilson Arata, o Eng. Júlio Arakaki, o Prof. Dr. Newton Maruyama, o Prof. Dr. José Reinaldo Silva e o Prof. Dr. Oswaldo Horikawa e, em particular, o amigo Prof. Dr. Jun Okamoto Jr. pelo interesse, sugestões e apoio fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Quanto aos meus amigos funcionários da EPUSP agradeço a todos e, em especial, sou grato a Rosi, Rosana e Cássio, companheiros singulares sempre solidários e atenciosos.

A Mercedes Benz do Brasil S.A. pelo apoio e, em especial, aos coordenadores do projeto UNI e ao Eng. Claudio Frazão pela dedicação demonstrada.

A Projeletra Consultoria e Projetos Elétricos Ltda., CAPES e CNPQ pelo apoio e incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Finalizando, agradeço a meus alunos André e Fabrício e todos os demais pela oportunidade de continuar meu perpétuo aprendizado ensinando-os.



Candidato: **Diolino J. Santos Filho**

Título do Trabalho: **"Controle de Sistemas Antropocêntricos de Produção baseado em Redes de Petri Interpretadas"**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

Data da Defesa: 18.06.1998

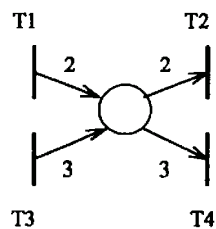
**ERRATA**

Pág. *XVII*

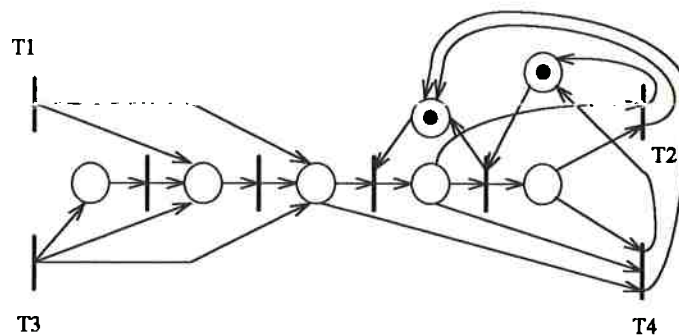
Onde se lê "industrias", leia-se "indústrias".

Pág. 7

Substituir a Fig. 1.1 (a) pela figura a seguir.



(a) RdP generalizada



(b) RdP ordinária equivalente a rede (a)

Pág. 17

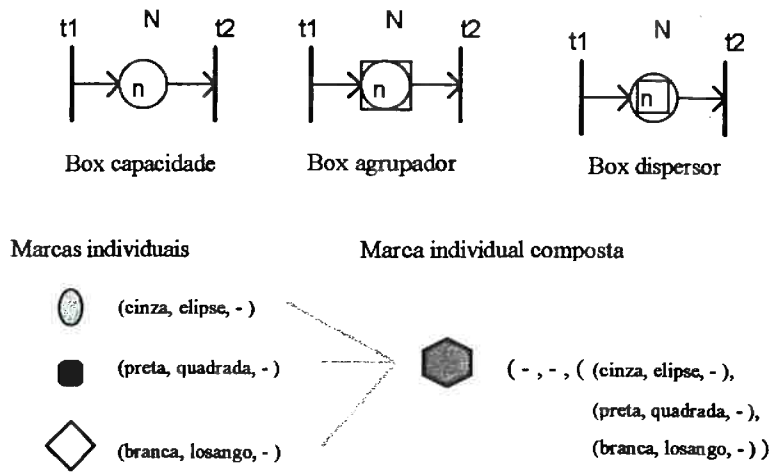
Onde se lê "O aplicação ...", leia-se "A aplicação ..."

Pág. 33

Na Tabela 2.1 onde se lê "tecolologias", leia-se "tecnologias".

Pág. 41

Substituir a Fig. 2.3 pela figura a seguir.

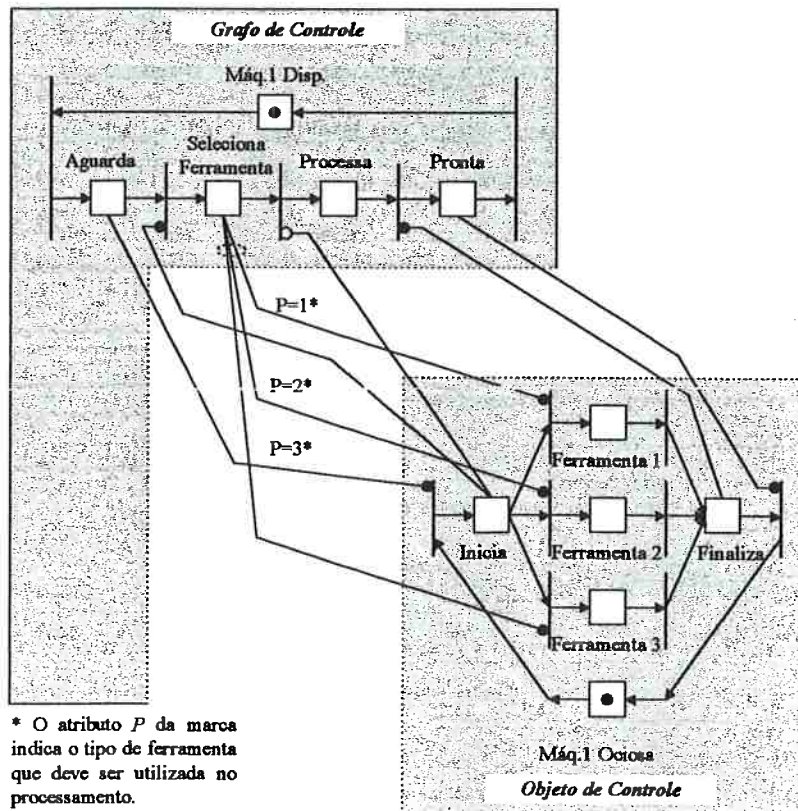


Pág. 60

Onde se lê "incluindo a representa-se ..." leia-se "incluindo a representação das ..."

Pág. 68

Substituir a Fig. 3.3 pela figura a seguir.



Pág. 158

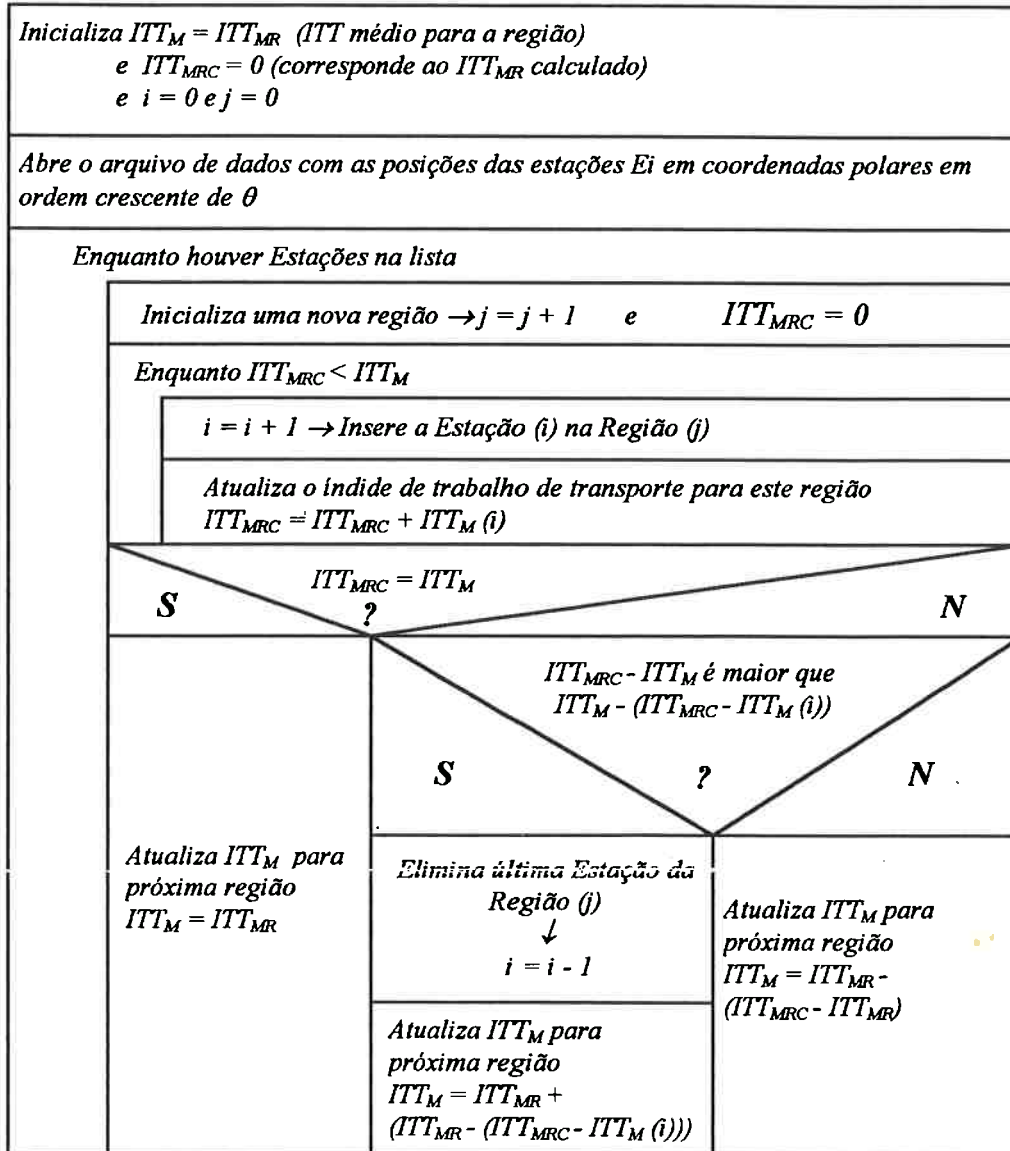
Substituir a equação 5.9 pela expressão a seguir.

$$ITT_{MR} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{N_k} D_{mj} \cdot (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \right) \right)}{M} \quad (5.9)$$

– Onde M é o número de VTs ou regiões.

Pág. 161

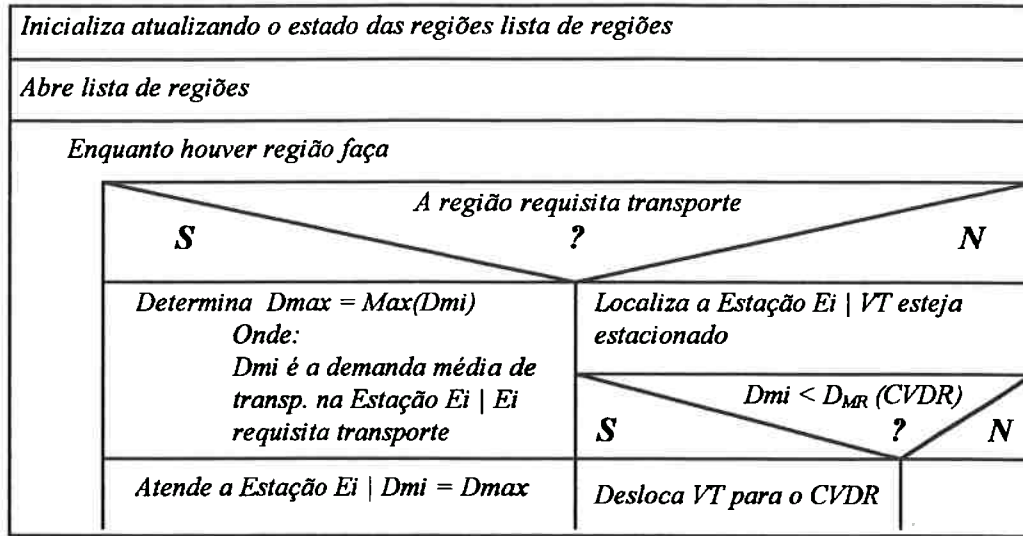
Substituir a Fig.5.6 pela figura a seguir.



Onde:

- $i \in \{1, \dots, N\}$  sendo N o número de estações
- $j \in \{1, \dots, M\}$  sendo M o número de regiões ou VTs
- $ITT_{MRC}$  é o  $ITT_{MR}$  calculado para delinear uma região
- $ITT_M(i)$  é o índice de trabalho de transporte da Estação  $i$
- $ITT_M$  é o índice de trabalho de transporte esperado para delinear uma região

Substituir a Fig. 5.7 pela figura a seguir.



# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b><i>VI</i></b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b><i>XII</i></b>
<b>Lista dos Principais Símbolos.....</b>	<b><i>XIV</i></b>
<b>Resumo .....</b>	<b><i>XVII</i></b>
<b>Abstract.....</b>	<b><i>XVIII</i></b>
<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b><i>1</i></b>
1.1 Redes de Petri na Modelagem de Sistemas Produtivos.....	4
1.1.1 Modelos de Redução de RdP .....	5
A) RdP Generalizadas .....	6
B) RdP Lugar/Transição .....	6
C) RdP Coloridas.....	7
1.1.2 Extensões das RdP.....	8
A) RdP com Arcos Inibidores e RdP com Prioridade.....	9
B) RdP Contínuas e as RdP Híbridas .....	10
C) RdP Não-Autônomas .....	12
1.1.3 O Grafcet e o SFC.....	15
1.2 Controle de Sistemas Produtivos .....	17
1.3 Objetivos e Etapas do Trabalho .....	20
A) Em Relação ao Estudo da Especificação e Modelagem do Sistema Global .....	21

B) Em Relação à Especificação do Controle de Processos.....	21
C) Em Relação ao Estudo de um Caso Prático (Sistemas de Transporte)...	23
D) Em Relação à Generalização de um Conjunto de Procedimentos para o Projeto de Sistemas de Controle.....	23
1.4 Organização do Texto .....	23
<b>Capítulo 2 - Sistemas Antropocêntricos de Produção e sua Modelagem .....</b>	<b>27</b>
2.1 Comportamento Baseado por Eventos.....	28
2.2 Abordagem Antropocêntrica .....	30
2.3 Premissas para a Modelagem de SAP .....	34
2.4 Fundamentos do MFG.....	37
2.5 Mark Flow Graph Estendido (E-MFG).....	39
2.5.1 As Marcas Individuais.....	39
2.5.2 Marcas Individuais Compostas.....	40
2.5.3 Manipulação dos Atributos das Marcas.....	41
2.5.4 Dinâmica das Regras de Disparo .....	42
2.6 Production Flow Schema (PFS) e seus Elementos .....	45
2.7 Alocação de Recursos e sua Modelagem .....	47
2.7.1 Correspondência entre <i>Etapa</i> e <i>Recurso</i> e <i>Arco-Recurso</i> .....	50
2.7.2 Rede Híbrida-Rede L/T do PFS-R .....	50
2.7.3 Rede Híbrida-PFS-R e E/MFG.....	52
2.8 Observações Complementares .....	56
<b>Cápítulo 3 - Controle de Processos em SAPs (Sistemas Antropocêntricos de Produção).....</b>	<b>59</b>
3.1 Evolução das Arquiteturas de Controle .....	60
3.2 Representação do Controle em E-MFG.....	63
A) Especificação de Intertravamentos .....	67

B) Arbitração de Conflitos .....	70
C) Manutenção e Detecção de Estados .....	71
D) Processamento Temporizado.....	71
3.3 Modelagem e Controle de Processos .....	72
3.4 PFS-R/E-MFG na Especificação do Controle .....	77
3.5 Observações Complementares .....	81
<b>Capítulo 4 - ‘Deadlock’ no Fluxo de Itens de SAPs .....</b>	<b>84</b>
4.1 Especificação do Problema de ‘Deadlock’ .....	86
4.2 Grafos de Alocação e Requisição de Recursos - GAR .....	91
4.3 Segmentos e Ciclos Fechados em um GAR.....	94
4.4 Procedimento para Evitar-se ‘Deadlock’.....	96
4.4.1 Métodos de Compensação Baseados em FIS.....	97
1) Compensação Simples .....	98
2) Compensação por Segmento .....	99
3) Compensação Complexa.....	100
4)Compensação em Comum.....	103
4.4.2 Detecção dos Ciclos Fechados em um GAR.....	103
4.4.3 Determinação dos Compensadores.....	106
4.5 Exemplo Aplicativo .....	111
4.6 Observações Complementares .....	118
<b>Capítulo 5 - Otimização da Alocação de Veículos de Transporte em SAPs.....</b>	<b>120</b>
5.1 Especificação do Problema de Alocação de VTs.....	124
5.1.1 Graus de Indeterminismo para o Controle de VTs de um SAP.....	127
5.2 Abordagens para o Problema do Transporte .....	129
5.3 Sistemas Reativos.....	134
5.3.1 SAPs como Sistemas Reativos .....	136
5.4 Mapeamento dos Pontos de Estacionamento dos VTs .....	139
5.4.1 Aplicação de Técnicas de Planejamento de Arranjo Físico .....	140

5.4.2	Centróide Virtual de Demanda Global de Transporte (CVDG).....	143
5.4.3	Centróides Virtuais de Demanda Regional de Transporte (CVDR).....	152
5.5	Algoritmo de Controle para Movimentação dos VTs.....	162
5.5.1	Especificação das Premissas Básicas .....	163
5.5.2	Especificação do Algoritmo de Controle .....	165
5.5.3	Alocação Ótima de VTs.....	171
5.6	Estudo de Caso .....	174
5.7	Observações Complementares .....	177
<b>Capítulo 6</b>	<b>- Procedimentos para o Projeto do Sistema de Controle de SAPs .....</b>	<b>180</b>
6.1	Extensão à Metodologia Padrão .....	182
6.2	A Etapa de Análise de Necessidades.....	186
6.3	Definição das Necessidades .....	191
6.4	Etapa de Projeto do Sistema de Controle.....	196
6.5	Projeto e Desenvolvimento do ‘Software’ de Controle .....	197
6.6	Etapa de Validação e Testes.....	200
6.7	Observações Complementares .....	203
<b>Capítulo 7</b>	<b>- Observações Finais .....</b>	<b>205</b>
7.1	Contribuição deste Trabalho.....	209
7.2	Trabalhos Futuros .....	211
7.3	Trabalhos Publicados.....	212
<b>Anexo A</b>	<b>- Exemplo de Aplicação da Metodologia PFS/MFG.....</b>	<b>216</b>
<b>Anexo B</b>	<b>- Problemas de Designação .....</b>	<b>221</b>



<b>Anexo C - Exemplo do Procedimento de Alocação dos VTs.....</b>	<b>226</b>
C.1 Modelagem da Dinâmica dos Transportadores.....	233
<b>Anexo D - Exemplo de Aplicação dos Procedimentos para o Projeto de Sistemas</b>	
<b>de Controle de SAPs .....</b>	<b>240</b>
D.1 Modelo da Centrífuga.....	241
D.2 Diagrama de Sistematização das Funções .....	243
D.3 Modelagem do Fluxo das Funções de Controle.....	256
D.4 Observações Complementares .....	277
<b>Bibliografia .....</b>	<b>279</b>

# LISTA DE FIGURAS

## Capítulo 1

1.1	Comparação entre os Modelos de RdP Generalizada e RdP Ordinária.....	7
1.2	RdP com Arco Inibidor .....	9
1.3	Exemplo de Sistema Modelado por RdP Híbrida .....	11
1.4	Exemplo de Modelagem em SFC.....	17
1.5	Partes de um Sistema Produtivo .....	21
1.6	Representação do Fluxo Vertical de Informações .....	22

## Capítulo 2

2.1	Elementos Básicos do MFG .....	38
2.2	Exemplo de Estrutura de uma Marca Individual.....	40
2.3	Os Boxes Funcionais Básicos e um Exemplo de Marca Individual Composta.....	41
2.4	Representação de um Box Controlador Alterando o Estado de uma Marca Individual .....	43
2.5	Representação de um Procedimento de <i>Filtragem Seletiva</i> .....	43
2.6	Alteração dos Atributos das Marcas Decorrentes do Disparo.....	45
2.7	Elementos do PFS.....	46
2.8	Elemento Atividade em Rede L/T.....	46
2.9	Elemento Distribuidor em Rede L/T .....	47
2.10	Arco-Recurso.....	50
2.11	Transformação do PFS-R .....	51
2.12	Um Recurso para Duas Etapas em Cascata.....	52
2.13	Representação em Rede L/T da Rede da Fig. 2.12 .....	53

2.14 Transformação do PFS-R para o caso E-MFG.....	54
2.15 Representação de um Recurso em Cascata .....	55

### Capítulo 3

3.1 Formas Básicas de Arquiteturas de Controle de Sistemas Produtivos.....	62
3.2 Representação do Dispositivo de Controle e Objeto de Controle de um SAP.....	66
3.3 Exemplo de Modelo E-MFG Conectando o Controle e o Objeto de Controle .....	68
3.4 Representação de Intertravamentos em um Grafo E-MFG.....	69
3.5 Exemplo de Modelo E-MFG com Retenção de Estado .....	71
3.6 Modelo de uma Seqüência de Produção Correspondente ao Produto $q$ .....	76
3.7 Comunicação entre Níveis de Controle em uma Arquitetura Hierárquica Distribuída.....	78
3.8 Modelo PFS-R de um Processo com Alocação e Compartilhamento de Recursos.....	80
3.9 Adição de Compensadores para as Macros do E-MFG .....	81

### Capítulo 4

4.1 Exemplo de Alocação Cíclica de Recursos.....	87
4.2 Pares Alocação e Requisição de um mesmo Produto em uma Determinada Etapa de sua Seqüência de Produção .....	92
4.3 Correlação entre os Modelos E-MFG de um Processo e o Modelo GAR Correspondente .....	93
4.4 Modelo GAR contendo CEF, PAI e PAT (HASEGAWA et al.[1996c]) .....	95
4.5 Representação do Compensador Simples.....	99
4.6 Exemplo de Compensação por Segmento .....	101
4.7 Exemplo de Compensação Complexa .....	102
4.8 Exemplo de Compensação em Comum.....	104
4.9 Algoritmo para Obtenção dos CFEs de um GAR.....	107

4.10	Modelo Estrutural do SAP a ser estudado .....	113
4.11	Modelo PFS-R/E-MFG Correspondente aos Processos a serem Executados .....	115
4.12	GAR Correspondente ao Sistema em Estudo .....	116
4.13	GAR com Compensadores Correspondente ao Sistema em Estudo .....	117
4.14	Modelo PFS-R/E-MFG Correspondente aos Processos a serem Executados .....	118

## Capítulo 5

5.1	'Layout' da Rede 4x4 do Estudo de Caso (JIN[1995]) .....	126
5.2	Arquitetura de um Sistema Reativo para o Caso de SAPs .....	138
5.3	Modelo do Sistema Produtivo para Cálculo do "Centro de Massa" .....	146
5.4	Modelo de Forças Elásticas .....	150
5.5	Arquitetura de Controle Distribuída em Vários Níveis Incluindo a Parte Reativa .....	155
5.6	Procedimento Aplicado para Definição das Regiões de um Sistema Produtivo .....	161
5.7	Algoritmo de Controle para Movimentação de VTs Confinadas em Regiões .....	166
5.8	Algoritmo de Controle para Alocar os VTs de Acordo com as Demandas de Transporte .....	170
5.9	Algoritmo de Controle para Manter o Volume de Trabalho dos VTs Uniforme .....	171
5.10	'Layout' da Instalação de uma planta de uma Indústria de Manufatura com a Indicação das Estações de Carga e Descarga de Veículos Transportadores .....	175

## Capítulo 6

6.1	Ciclo de Vida de um Sistema de Controle .....	180
6.2	Ciclo de Prototipagem .....	181

6.3 Modelagem dos Elementos do Objeto de Controle .....	188
6.4 Exemplo de Modelagem do Objeto de Controle em E-MFG .....	190
6.5 Diagrama de Estruturação das Funções de Controle .....	191
6.6 Arquitetura do Dispositivo de Controle .....	192
6.7 Exemplo de Estrutura de Programa Segmentada em Módulo Funcionais ...	198
6.8 Relação entre a Estrutura do Programa e o Grafo PFS-R/E-MFG de Controle.....	200
6.9 Partes do Modelo Global de Sistema Produtivo .....	201

#### **Anexo A**

A.1 Modelo Esquemático da Rampa e dos Guinchos .....	217
A.2 Modelo Esquemático do Dispositivo de Sentamento da Rampa.....	218
A.3 Sequências de Extensão e Retração da Rampa.....	219
A.4 Detalhamento da Atividade “ <i>Subir Totalmente...Dispositivo de Sentamento</i> ” .....	220

#### **Anexo C**

C.1 Modelo PFS-R Genérico de cada um dos Transportadores + Carreta Adotado no Estudo do Sistema .....	235
C.2 Modelo de um Transportador + Carreta em E-MFG .....	236
C.3 Modelo Correspondente à Operação de Carga/Descarga de Carretas .....	237
C.4 Modelo E-MFG da Rota do Transportador C .....	238
C.5 Modelo E-MFG da Rota do Transportador C .....	239

#### **Anexo D**

D.1 Modelo Estrutural da Centrífuga .....	242
D.2 Esboço da Curva de Variação de Velocidade de Rotação da Centrífuga em Função do Tempo.....	243
D.3 Diagrama Correspondente aos Três Primeiros Níveis das Funções de	

Controle.....	245
D.4 Diagrama da Função de Controle <i>Operador Realiza Setup do Painel de Controle</i> .....	246
D.5 Diagrama da Função de Controle <i>Operador Executa Setup dos Atuadores Via Botão de Parada</i> .....	247
D.6 Diagrama das Funções de Controle <i>Partida da Centrífuga e Arranque da Centrífuga</i> .....	248
D.7 Diagrama das Funções de Controle <i>Inicia Carregamento em 230rpm e Dosagem do Melaço</i> .....	248
D.8 Diagrama da Função de Controle <i>Finaliza Carregamento</i> .....	249
D.9 Diagrama das Funções de Controle <i>Lavagem Temporizada por água e Lavagem Temporizada por Vapor</i> .....	250
D.10 Diagrama das Funções de Controle <i>Separação Temporizada de Mel Pobre e Separação Temporizada de Mel Rico</i> .....	251
D.11 Diagrama das Funções de Controle <i>Aceleração até 590rpm, Aceleração até 1175rpm, e Centrifugação Temporizada</i> .....	252
D.12 Diagrama das Funções de Controle <i>Desaceleração até 590rpm, Desaceleração até 240rpm, Desaceleração até 100rpm e Desaceleração até 60rpm</i> .....	253
D.13 Diagrama das Funções de Controle <i>Controle da Tampa de Fundo e Posicionamento do Descarregador</i> .....	254
D.14 Diagrama das Funções de Controle <i>Lavagem da Tela de Fundo, Inicia Novo Ciclo e Interrupção do Processo</i> .....	255
D.15 Modelo PFS do Sistema .....	258
D.16 Modelo MFG/PFS do Sistema .....	259
D.17 Modelo PFS da Atividade <i>/Inicialização Modo Automático</i> .....	260
D.18 Modelo MFG/PFS da Atividade <i>/ Inicialização Modo Automático</i> .....	260
D.19 Modelo MFG da Atividade <i>/Setup Painel de Controle</i> .....	261
D.20 Modelo MFG da Atividade <i>/Setup Painel de Controle e sua Conexão com o Dispositivo de Comando</i> .....	262
D.21 Modelo da Atividade <i>/Setup Atuadores e sua Conexão com o Modelo da</i>	

Parte de Controle, da Parte de Comando e da Parte de Monitoração .....	263
D.22 Modelo PFS da Atividade <i>/Setup Atuadores</i> .....	264
D.23 Conexão do Modelo da Atividade <i>/Acionar Botão Parada</i> com a Parte de Comando.....	264
D.24 Conexão do Modelo da Atividade com a Parte de Comando e Monitoração .....	265
D.25 Modelo da Atividade <i>Fechar Tampas</i> .....	266
D.26 Modelo da Atividade <i>Fechar Comporta do Alimentador</i> .....	267
D.27 Modelo da Atividade <i>Fechar Tampa de Fundo</i> .....	268
D.28 Modelo da Atividade <i>Fechar Bandeja de Gotejo</i> .....	269
D.29 Modelo da Atividade <i>Fechar Válvulas de Lavagem</i> .....	270
D.30 Modelo da Atividade <i>Fechar Válvula da Lavagem da Bandeja de     Gotejo</i> .....	271
D.31 Modelo da Atividade <i>Fechar Válvula de Lavagem por água</i> .....	272
D.32 Modelo da Atividade <i>Fechar Válvula de Lavagem por Vapor</i> .....	273
D.33 Modelo da Atividade <i>Setup do Motor Principal</i> .....	273
D.34 Modelo da Atividade <i>Setup do Motor Principal\Desenergizar     Motor Principal</i> .....	274
D.35 Modelo da Atividade <i>Setup do Motor Principal\Adicionar Freio     Pneumático</i> .....	275
D.36 Modelo da Atividade <i>Posicionamento Descarregador\Subida Repouso</i> ....	276

# LISTA DE TABELAS

## Capítulo 2

2.1 Comparação entre as Abordagens Tecnocêntrica e Antropocêntrica .....	33
--	----

## Capítulo 3

3.1 Síntese das Características, Vantagens e Desvantagens das Formas de Controle Ilustrada na Fig.3.1 .....	64
3.2 Os Vários Tipos de Intertravamentos.....	69
3.3 Os Tipos de Conflitos e sua Arbitragem.....	70

## Capítulo 6:

6.1 Atividades Contidas em Procedimentos de Controle de um Sistema de Controle .....	174
6.2 Posição Física das Estações de Carga/Descarga de um SAP.....	185
6.3 Programação dos Produtos a serem Processados em um SAP.....	186

## Anexo C

C.1 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador A .....	227
C.2 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador B .....	228
C.3 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador B .....	229
C.4 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador B .....	230
C.5 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador C .....	230
C.6 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador D .....	231
C.7 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador E .....	231



C.8 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador F.....	232
C.9 Fluxo de Transporte Realizado pelo Transportador F.....	233
C.10 Estado Atingido por um Transportador em Operação no Sistema.....	234

# LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS

## Capítulo 3

$Q$	Conjunto de $n$ produtos diferentes a serem processados
$q$	Identifica o produto
$n$	Conjunto dos números naturais
$p_q$	Seqüência de produção do produto $q$
$L_q$	Comprimento da seqüência de produção do produto $q$
$s_q(i)$	A $i$ -ésima etapa da seqüência de produção do produto $q$
$s_q(0)$	Condição inicial para iniciar a seqüência de produção do produto $q$
$s_q(L_q + 1)$	Condição em que a seqüência de produção do produto $q$ está concluída
$r_q^*$	Seqüência de recursos correspondente à seqüência de produção $p_q$ do produto $q$
$r_q(j)$	Recurso utilizado na etapa $s_q(i)$
$Cr_q(j)$	Box capacidade que modela cada recurso $r_q(j)$
$Ps_q(i)$	Box do tipo simples que modela cada etapa $s_q(i)$ da seqüência de produção do produto $q$

## Capítulo 4

$N_D$	Número total de situações de 'deadlock' possíveis
$c$	Box capacidade que representa o compensador em E-MFG
$Cr_i$	Box capacidade que representa as unidades do recurso $r_i$ .
$R$	Conjunto de recursos
$A$	Conjunto de pares ordenados $(R_i, R_j)$
$s_{ij}$	Etapa de produção inscrita no arco de $R_i$ para $R_j$
$G$	Matriz associada ao grafo GAR

$p$	Comprimento do caminho que liga o vértice $R_i$ a $R_j$
$g_{ij}$	Elemento de posição $(i, j)$ na matriz $G^P$
$m$	Número de caminhos de comprimento $p$

## Capítulo 5

$n_a$	Número de indivíduos
$m_t$	Número de tarefas
$U_{ij}$	Custos correspondentes às combinações de indivíduos e tarefas
$\mathcal{S}$	Experimento que representa todos os eventos que podem ocorrer num sistema
$U$	Uma partição de $\mathcal{S}$
$A_i$	Eventos de atendimento do VT(i) a uma determinada requisição de transporte
$H(U)$	Entropia da partição $U$ .
$\Omega$	Custo total do arranjo físico
$w_{ij}$	Medida de interação entre as atividades $i$ e $j$
$\lambda_{ij}$	Medida de distância entre as atividades $i$ e $j$
$k_{ij}$	Fator de conversão para os custos entre as atividades $i$ e $j$
$c_i$	Custo fixo de cada atividade
$N$	Número de estações de carga/descarga do sistema produtivo
$E_G$	Posição do estacionamento do VT em $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$
$O$	Origem do sistema do plano $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$
$D_{mi}$	Taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação $E_i$
$P_i$	Posição da estação de carga $E_i$ em $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ no sistema
$m_i$	Massa do ponto $i$
$G$	Centro de massa
$(x_G, y_G)$	Coordenadas de $G$ em $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$
$K$	Constante de elasticidade
$\vec{r}$	Deslocamento medido a partir de um ponto fixo para dimensionar a força restauradora

$\vec{F}$	Força do tipo restauradora
$\vec{R}_G$	Resultante das forças no ponto G
$R_x$	Projeção de $\vec{R}_G$ no eixo $x$
$R_y$	Projeção de $\vec{R}_G$ no eixo $y$
$K_i$	Constante elástica da força $\vec{F}_i$
$M$	Número genérico de VTs que integram um SAP
$D_{MR}$	Valor médio de demanda regional de transporte
$T$	Total de estações destino associadas ao fluxo de materiais no sistemas
$ITT_i$	Índice de trabalho de transporte na Estação $E_i$
$M_i$	Número de estações destino $E_j$ a partir da Estação $E_i$
$ITT_{MR}$	Índice de volume de trabalho médio de transporte por região
$(x_{CG}, y_{CG})$	Coordenadas do CVDG em $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$
$N_i$	Número de Estações destino $E_j$ alcançadas a partir de $E_i$
$ITT_{MRC}$	$ITT_{MR}$ calculado para delinear uma região
$ITT_M(i)$	Índice de trabalho de transporte da Estação $i$
$ITT_M$	Índice de trabalho de transporte esperado para delinear uma região
$N_{RT}$	Ordens pendentes de requisições de transporte
$N_{VTT}$	Total de VTs disponíveis para atender as pendências
$N_{VTR}$	Número. <i>total de VTs disponíveis para serem realocados nas regiões</i>
$C_{ij}$	Custos correspondentes a todas as combinações de VTs e trabalhos de transporte

# RESUMO

A necessidade por indústrias altamente produtivas, autônomas e flexíveis para atenderem a uma crescente demanda de um mercado de produtos heterogêneos e variáveis, tem deslocado o caráter tecnocêntrico de sistemas de produção em direção a uma abordagem baseada no paradigma de cultura técnica. Esta abordagem é focada no homem considerando seu aprimoramento intelectual e de sua capacidade operacional.

Neste contexto, este trabalho propõe uma abordagem baseada em sistemas antropocêntricos para especificação dos procedimentos para o projeto de sistemas de controle de sistemas de produção, introduzindo-se a definição genérica de sistema antropocêntrico de produção (SAP) como uma classe de sistemas a eventos discretos.

Aplica-se assim, as técnicas do E-MFG (Enhanced Mark Flow Graph) e PFS-R (Production Flow Schema with Resources), que são redes de Petri interpretadas, para a modelagem da planta e do sistema de controle.

Em relação à especificação do fluxo de itens no sistema, apresenta-se uma técnica para o projeto de compensadores nos modelos E-MFG de controle que evitam 'deadlocks'.

No sentido de mostrar a efetividade dos conceitos apresentados, sua aplicação é apresentada para o caso de controle do fluxo de veículos de transporte em um SAP.

Concluindo, é introduzido um procedimento sistematizado e racional baseado em classes de Redes de Petri interpretadas para o projeto de sistemas de controle de sistemas produtivos dentro dos novos padrões de autonomia, flexibilidade e qualidade num contexto que exige uma completa reestruturação organizacional considerando-se o fator humano.

## ABSTRACT

The need for industries with high productivity, autonomy and flexibility to satisfy an increasing demand of a market with heterogeneous and varying products has moved the technocentric character of production systems towards an approach based on technical culture paradigm. This approach has its focus on the man and his improving intellectual and operational capacity.

---

In this context, this work proposes an approach based on anthropocentric systems to specify control systems designs of production systems. This is obtained introducing the generic definition of anthropocentric production systems (APS) as a class of discrete event systems.

The E-MFG (Enhanced Mark Flow Graph) and PFS-R (Production Flow Schema with Resources), which are Interpreted Petri nets, are applied for modeling of both plant and control system.

In relation to the specification of the items flow in the system, a technique for compensators design in the E-MFG is presented which allows the avoidance of deadlocks.

In order to show the effectiveness of these concepts they are applied to control an APS transportation system.

To conclude, a systematic and rational approach based on Interpreted Petri nets class is introduced to specify control system designs of production systems. This approach goes towards new patterns of autonomy, flexibility and quality that requires a complete organizational restructure considering the human factor.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A crescente competitividade das empresas e a globalização da economia são fatores fundamentais que contribuem para a evolução do nível de heterogeneidade dos mercados tanto internos como externos que, por sua vez, se constitui em um dos principais desafios para o setor industrial. Isto ocorre porque a diversificação propicia o surgimento de consumidores mais exigentes, que valorizam a possibilidade de escolha entre vários produtos ou variantes de produtos (VALLE et al. [1995]). Este fato exige uma postura por parte das empresas que se traduz em adequar-se à capacidade de fabricar uma gama de produtos diferenciados, de elevada rotatividade, envolvendo ciclos de vida menores.

Portanto, os sistemas produtivos devem apresentar um comportamento baseado em maximização de critérios de controle de qualidade e flexibilidade operacionais condizentes com as necessidades impostas pelos consumidores. Neste contexto, para que uma empresa torne-se competitiva, ela depende da existência de uma estrutura organizacional que agregue três princípios fundamentais (DOUMEINGTS et al. [1995]):

- Automação. Viabiliza o aumento do índice de produtividade, redução dos custos, e controle de qualidade mais eficientes.

- Flexibilidade. Permite a operacionalidade do sistema para atender a produção de lotes variados, de acordo com o comportamento da demanda de mercado.
- Integração. Possibilita a conectividade física e lógica tanto dos equipamentos e máquinas que constituem o conjunto de recursos do sistema, quanto do homem que representa um dos elementos fundamentais capaz de intervir no controle dos processos em geral.

Os conceitos citados implicam em considerar-se uma estratégia para controlar o sistema produtivo de maneira que cada uma de suas máquinas seja capaz de realizar um conjunto de operações (de modo automático, flexível e integrado) que pode estar associado à fabricação de produtos diferentes e onde cada produto possui uma seqüência de operações pré-determinada. Esta possibilidade de fabricar-se uma heterogeneidade de produtos exige um sistema de gerenciamento do fluxo de materiais versátil e autônomo o suficiente para executar uma variedade de rotas diferentes de acordo com a variabilidade de processos a serem executados concomitantemente. Desta forma, os sistemas de produção podem ser interpretados como sendo um conjunto de estações de trabalho independentes, dotadas de um determinado grau de autonomia e flexibilidade operacional e distribuídas em um arranjo físico adequado de maneira que a integração destas unidades ocorre a partir do momento em que os processos a serem executados neste ambiente evoluem dinamicamente (INAMASU [1995]).

Portanto, para realizar o fluxo de materiais que integra as unidades destes sistemas para a realização dos processos produtivos, é necessário agregar-se um sistema de transporte capaz de suportar esta autonomia e flexibilidade operacionais. Em relação ao de sistemas de transporte, em geral, existe uma variedade de rotas que um determinado produto



pode realizar em tempo real, necessitando e enfatizando o papel da intervenção de operadores e/ou algum sistema artificial de tomada de decisões.

Baseado no conjunto de características apresentadas, há três aspectos fundamentais que devem ser considerados quando se planeja o controle dos processos e do fluxo de itens em um sistema produtivo integrado (SANTOS FILHO [1995b]):

- Em uma primeira instância é necessário controlar-se o seqüenciamento das operações inerente à execução de cada um dos processos em si.
- Em segundo lugar é necessário controlar-se *o que* será transportado, uma vez que há uma variedade de produtos que podem ser processados em um determinado instante em cada uma das unidades produtivas de maneira assíncrona e paralelamente.
- E, finalizando, é necessário controlar-se *como* será efetuado o transporte, envolvendo o problema de rotas e designação de transportadores.

De uma forma genérica, na concepção de sistemas produtivos desta natureza, há uma tendência acentuada em adotar-se a filosofia de controle distribuído compatível com a complexidade funcional e autonomia operacional dos elementos que compõem estes sistemas (HIRSCH et al. [1995]). Observa-se também que há uma necessidade de formalismos adequados para suportar as etapas de especificação, modelagem, análise e implementação destes sistemas em que, de acordo com a tendência observada, deve-se considerar o paradigma de um sistema de controle distribuído que coordena processos assíncronos e concorrentes, em que a interação com o homem não pode ser desconsiderada.

Neste Capítulo apresenta-se inicialmente uma revisão do tema redes de Petri (RdP abreviadamente), discutindo-se a adequabilidade e o poder de modelagem dos vários tipos de rede. Em seguida, é apresentada a problemática de controle de sistemas produtivos e a necessidade de técnicas adequadas para representar estratégias de controle compatíveis com a evolução dinâmica que estes sistemas devem apresentar.

Finaliza-se o presente Capítulo apresentando-se os objetivos deste estudo e a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho em si.

## **1.1 REDES DE PETRI NA MODELAGEM DE SISTEMAS PRODUTIVOS**

Os sistemas produtivos abordados no presente estudo podem ser interpretados como sistemas dirigidos por eventos em que o homem é capaz de interagir na sua evolução dinâmica, havendo um conjunto de entidades ativas responsáveis pela transformação do estado dos itens que fluem no sistema e um conjunto de entidades passivas responsáveis pelo armazenamento e manutenção de estados destes itens (SANTOS FILHO; MIYAGI [1991]).

Para especificar-se sistemas desta natureza é possível adotar-se uma abordagem ‘top-down’ ou ‘bottom-up’, dependendo da natureza da técnica que está sendo utilizada para a modelagem (PERKUSICH [1994]). Nos estudos recentes que envolvem sistemas produtivos observa-se uma forte tendência em utilizar-se redes de Petri, enfatizando RdP aplicada à modelagem e análise de sistemas e não como objeto de estudo teórico (PETERSON [1981], REISIG [1985], MURATA [1989], REISIG [1992]).

As abordagens pertinentes a RdP encontradas na literatura podem ser organizadas em três classes fundamentais:

- As RdP básicas que são denominadas ordinárias;
- As reduções das RdP ordinárias e;
- As extensões das RdP ordinárias.

De uma maneira sucinta, pode-se dizer que, conceitualmente, uma RdP ordinária é um grafo bipartido em que lugares de capacidade ilimitada e transições alternam-se conectados por arcos orientados de peso unitário, formando caminhos que compõem a estrutura da rede. Constitui-se num modelo elementar adequado para visualizar-se comportamentos que envolvem paralelismo, sincronização e compartilhamento de recursos. Este é portanto o modelo básico de rede que permite extensões dependendo da aplicação a que se destina.

### **1.1.1 Modelos de Reduções de RdP**

As reduções correspondem a descrições simplificadas que pretendem sintetizar a apresentação gráfica dos modelos mas que ainda podem ser representadas adequadamente por RdP ordinárias. Como exemplos de reduções tem-se:

- RdP generalizadas.
- RdP de capacidade finita.
- RdP coloridas.

### **A) RdP Generalizadas**

Quando um modelo é definido para representar um determinado sistema, o objetivo pode ser explicar “como o sistema funciona”, isto é, sua operacionalidade frente à realização de um determinado conjunto de processos. Neste caso, necessita-se de uma análise qualitativa de um modelo que pode ser representado por redes de Petri autônomas<sup>1</sup> ordinárias ou generalizadas (SILVA [1985]).

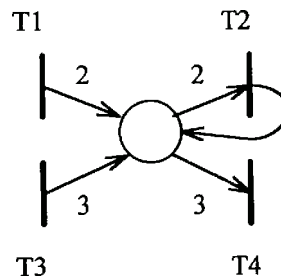
As RdP generalizadas, correspondem a uma extensão das RdP ordinárias em que há a possibilidade de atribuir-se pesos aos arcos. Portanto, são adequadas para representar um nível mais elevado de abstração em que se considera o sistema dividido em blocos funcionais e suas principais relações. A Fig. 1.1 ilustra esta característica através de um exemplo de modelo em RdP generalizada e a RdP ordinária correspondente.

### **B) RdP Lugar/Transição**

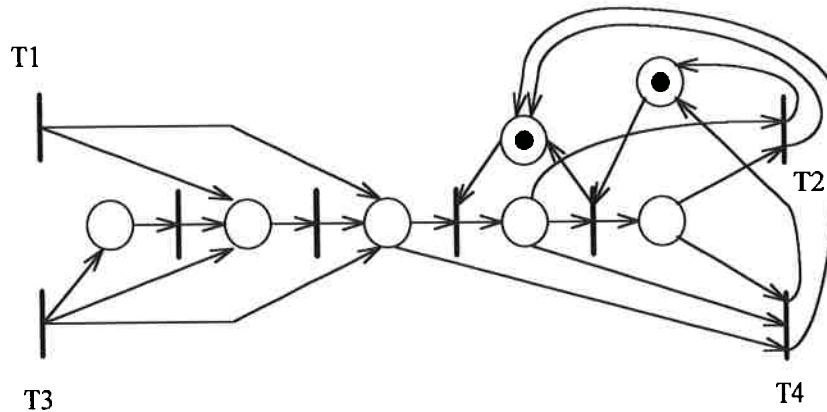
As RdP limitadas (DAVID; ALLA [1994]) são denominadas também lugar/transição (RdP L/T) e correspondem a uma extensão das RdP generalizadas em que se introduz capacidades (valores inteiros estritamente positivos) associadas aos lugares. Esta restrição vem de encontro à necessidade de modelar-se consistentemente entidades físicas que possuem capacidade limitada, como por exemplo, dispositivos de armazenamento temporário de produtos em um sistema produtivo (‘buffers’), ou então, quantidades limitadas de memória para armazenamento de dados em processamentos computacionais.

---

<sup>1</sup> Redes de Petri autônomas são redes não sincronizadas nem temporizadas.



(a) RdP generalizada



(b) RdP ordinária equivalente a rede (a)

Fig. 1.1 Comparação entre os modelos de RdP generalizada e RdP ordinária

### C) RdP Coloridas

Por sua vez, as RdP coloridas (JENSEN [1990]) são adequadas para condensar a descrição e análise de sistemas compostos por diversos subsistemas de estrutura e comportamentos semelhantes capazes de trabalharem em paralelo. Nestas redes as marcas são individualizadas por uma variável (cor) que as identifica.

Analogamente, associa-se um conjunto de variáveis (cores) a cada transição e a cada lugar da RdP colorida. O disparo de uma transição elimina e acrescenta marcas, conforme uma RdP ordinária, com a ressalva de que obedece às dependências funcionais estabelecidas entre as cores das marcas e as cores de disparo da transição em questão.

### 1.1.2 Extensões das RdP

As extensões das RdP ordinárias correspondem a modelos em que se incorporam regras adicionais de funcionalidade para enriquecer o poder de modelagem. Estas extensões estão diretamente relacionadas à natureza da aplicação. São consideradas três subclasses fundamentais:

- Modelos equivalentes a máquinas de Turing. Corresponde às RdP com arcos inibidores (DAVID; ALLA [1994]) e as RdP com prioridade (SILVA [1985]).
- Modelos para sistemas contínuos e híbridos. Corresponde às RdP contínuas e as RdP híbridas (LE BAIL et al. [1991]).
- Modelos de sistemas que evoluem em função da ocorrência de eventos externos ou do tempo. Corresponde às RdP sincronizadas (DAVID; ALLA [1994]), RdP temporizadas (DiCESARE et al. [1995]) e RdP estocásticas (DiCESARE et al. [1995]).

### A) RdP com Arcos Inibidores e RdP com Prioridade

Há sistemas que se comportam de tal maneira que seus modelos em RdP necessitam representar condições relacionados com a comprovação direta de que não há marcas em determinados lugares. Entretanto, nas RdP ordinárias as condições que permitem o disparo de uma transição exigem que o número de marcas seja estritamente positivo, inviabilizando o “teste do zero”<sup>2</sup>. Neste sentido, foi introduzido o elemento ‘arco inibidor’ nas RdP, capaz de comprovar diretamente a ausência de marcas em um determinado lugar. Esta subclasse denomina-se RdP com arcos inibidores.

Um arco inibidor é representado por um arco orientado que se origina em um determinado lugar até alcançar uma transição. A terminação do arco junto à transição é marcada por um pequeno círculo conforme ilustra a Fig. 1.2.

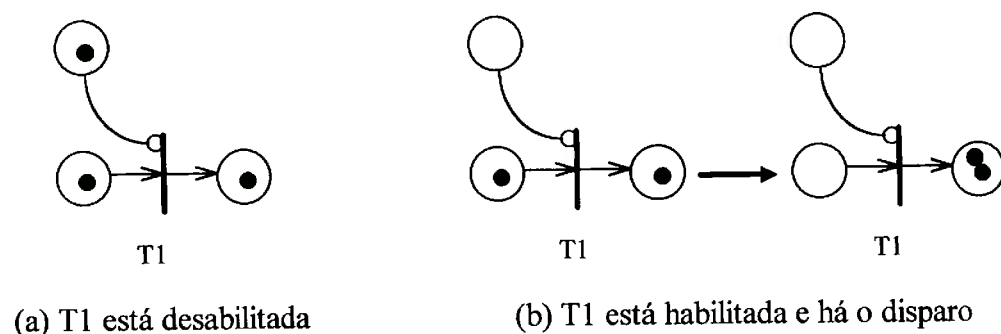


Fig. 1.2 RdP com arco inibidor

<sup>2</sup> O “teste do zero” corresponde a comprovação direta de que não há marcas em um determinado lugar de uma RdP.

As RdP com prioridade são utilizadas sempre que for necessário realizar uma escolha entre um número finito de transições habilitadas. Estas redes são realizadas a partir de RdP ordinárias em que se agrega uma relação de ordem parcial às transições da rede. É interessante observar que uma RdP com prioridade herda o poder computacional de uma máquina de Turing (LANGDON; FREGNI [1981]) e que, portanto, pode ser modelada por uma RdP com arcos inibidores, mas que não pode ser transformada em uma RdP ordinária (DAVID; ALLA [1994]).

### **B) RdP Contínuas e as RdP Híbridas**

As RdP contínuas, caracterizam-se por possuírem uma marcação que deixa de ser representada por valores inteiros e passa a ser descrita através de números reais positivos. Nestes termos, disparar-se uma transição significa realizar-se um fluxo contínuo.

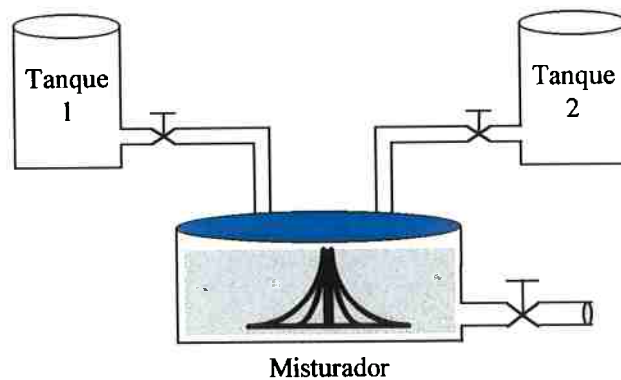
Em uma RdP ordinária o disparo de uma transição determina um fluxo de marcas que corresponde a retirada de uma marca de cada lugar de entrada da respectiva transição e o acréscimo de uma marca em cada lugar de saída desta transição. Entretanto, em RdP contínuas associa-se uma taxa de disparo a cada transição. Esta taxa é um valor real estritamente positivo e representa uma “quantidade de disparo” que não é um inteiro, isto é, não corresponde a um valor discreto.

Estas redes são adequadas para representar uma determinada classe de sistemas que não pode ser modelada por RdP ordinárias ao mesmo tempo em que permite uma representação adequada através de RdP ordinárias com um número bastante elevado de

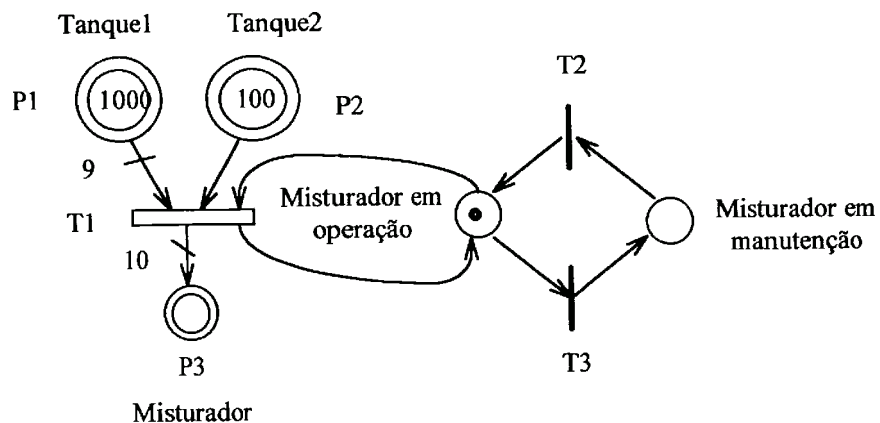


marcas. Ainda neste contexto existem as RdP híbridas que contém tanto lugares e transições discretas quanto lugares e transições contínuas.

A Fig. 1.3 representa um exemplo de mistura de materiais comumente utilizado em indústrias que envolvem processos químicos. Neste caso supõe-se que o material do Tanque 1 é adicionado ao material do Tanque 2 na proporção de 9:1.



(a) Estrutura do sistema



(b) Modelo em RdP híbrida

Fig 1.3 Exemplo de sistema modelado por RdP híbrida

Esta mistura é agitada continuamente no Tanque misturador para garantir um certo grau de homogeneidade do produto resultante. Uma falha no misturador deve interromper o processo para não comprometer a qualidade do produto. A Fig. 1.3(b) representa o modelo em RdP híbrida em que os lugares representados por círculos duplos e as transições representadas por retângulos são elementos contínuos, enquanto os demais lugares e transições são elementos discretos. Observa-se que uma falha no misturador interrompe imediatamente o processo.

### **C) RdP Não-Autônomas**

Nas seções anteriores foram apresentadas RdP autônomas, adequadas para o estudo de sistemas produtivos quando o propósito é aplicar uma abordagem qualitativa.

Portanto, resta considerar extensões capazes de descreverem não apenas *o que acontece*, mas também *quando os eventos acontecem*. Neste contexto, será possível modelar comportamentos que dependem da sincronização com eventos externos ou então cuja dinâmica dependa do tempo.

As RdP sincronizadas possuem o recurso de associar eventos externos às transições sendo que um evento externo corresponde a uma alteração no estado do mundo externo. Enquanto em uma RdP autônoma uma transição pode ser disparada se estiver habilitada (mas não se sabe precisamente quando irá disparar), em uma RdP sincronizada um evento é associado a cada transição e o disparo destas transições ocorrerá se a transição em questão estiver habilitada e *quando* o evento associado a ela ocorrer.

Os sistemas que apresentam um comportamento cuja funcionalidade depende do tempo podem ser descritos por RdP temporizadas. Corresponde tipicamente à situação em que é necessário computar-se um determinado intervalo de tempo entre o início e o término de uma operação. Existem dois métodos básicos para modelar-se o tempo nestas redes:

- Associação do parâmetro tempo aos lugares (origina-se as RdP L-temporizado), ou;
- Associação do parâmetro tempo às transições (neste caso tem-se uma RdP T-temporizada).

No caso de uma RdP L-temporizado, a cada lugar  $P_i$  associa-se o intervalo de tempo  $d_i$ , que pode ser nulo. Quando uma marca é colocada em um lugar  $P_i$ , esta marca permanece retida neste lugar pelo menos durante  $d_i$ . Decorrido o tempo  $d_i$ , diz-se que a marca torna-se *disponível*. Para considerar-se as condições de habilitação para o disparo de uma transição é necessário que a marca esteja no estado *disponível*.

Analogamente, numa RdP T-temporizada associa-se os intervalos de tempo  $d_i$  a cada uma das transições  $T_i$ . Uma marca permanece no estado *reservada* para o disparo de uma transição  $T_i$  durante o tempo  $d_i$ , após o qual assume o estado *não-reservada*. Apenas as marcas que estão no estado *não-reservada* podem ser consideradas para efeito de habilitação de disparo.

Estas redes são particularmente úteis para análise de desempenho de sistemas. Entretanto, existem fenômenos que não podem ser modelados adequadamente através de parâmetros de duração de tempo fixos. É o caso, por exemplo, do tempo de operação de

uma máquina durante a manufatura de um determinado produto. Esta duração pode ser modelada por uma variável probabilística e/ou aleatória.

As RdP estocásticas permitem uma representação do tempo através de variáveis probabilísticas e/ou aleatórias. Comumente, adota-se uma distribuição exponencial. Nestes termos, a marcação  $M(t)$  de uma RdP estocástica corresponde a um processo de Markov homogêneo sendo que uma cadeia de Markov homogênea pode ser associada a cada RdP estocástica (DAVID; ALLA [1994]).

Por sua vez, para aplicar-se RdP na modelagem de sistemas produtivos é preciso adotar-se uma interpretação. Esta interpretação consiste em associar-se um significado físico às condições de evolução da rede, bem como definir as ações resultantes da evolução dinâmica de sua marcação. De uma forma genérica, diz-se que a rede representa a estrutura correspondente à descrição do sistema e a sua interpretação está associada a uma determinada semântica.

Uma RdP sincronizada a qual se associa uma semântica, apresenta três características fundamentais (DAVID; ALLA [1994]):

- É sincronizada.
- É L-temporizada.
- Incorpora uma parte de processamento de dados cujo estado é definido a partir de um conjunto de variáveis  $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots\}$ . Este estado é modificado pelas operações  $O = \{O_1, O_2, O_3, \dots\}$  que são associadas aos lugares e determina os valores das condições  $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots\}$  que são associadas às transições.

O disparo de uma transição  $T_i$  em uma RdP desta natureza ocorre quando a transição está habilitada, a condição  $C_i$  é verdadeira e o evento  $E_i$  ocorre.

Neste contexto, estas redes permitem a modelagem de sistema de controle adequados para representarem a dinâmica de sistemas em tempo real e a implementação de controladores lógicos.

### 1.1.3 O GRAFCET e o SFC

Há estruturas específicas baseadas em RdP ordinárias que se destacam em virtude da aplicação prática. É o caso do GRAFCET e do SFC definidos para modelarem controladores lógicos e que se constituem em ferramentas efetivas para aplicações em automação industrial (BITTAR [1993], MARCONCINI; ROSÁRIO [1994]).

O GRAFCET foi definido inicialmente pela AFCET (Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique) na década de 70 e relaciona-se fortemente às RdP interpretadas, apresentando algumas singularidades. É composto por *steps* (representados por quadrados) e *transitions* (representadas por barras) conectados por arcos. A cada *step* associa-se uma ação podendo estar no estado ativo (marcado) ou inativo (não-marcado). Define-se o parâmetro *receptividade* de uma *transition* como sendo uma função que depende do estado das variáveis de entrada e do estado interno. Desta forma, uma *transition* é disparável se estiver habilitada (todos os *steps* de entrada estão ativos) e se a *receptividade* da mesma for verdadeira.

Uma conclusão imediata consiste no fato dos *steps*, *transitions* e arcos de modelos GRAFCET identificarem-se com os lugares, transições e arcos orientadas das RdP. A

diferença básica está no fato da marcação no GRAFCET ser Booleana (estado ativado ou não de um *step*) enquanto a marcação de uma RdP é numérica.

Esta diferença inexistente para o caso em que a RdP é do tipo condição/evento, isto é, os lugares representam condições e as transições representam eventos sendo que a marcação de um lugar indica que a correspondente condição está satisfeita, ou seja, é verdadeira. Com isto, a marcação assume a natureza Booleana observada no GRAFCET.

Na representação gráfica padrão de um modelo de controle em GRAFCET o estado inicial é representado por um quadrado duplo. As ações são executadas à medida em que os respectivos *steps* tornam-se ativos, associando-se a estes *steps* o conjunto de saídas do controlador. Em contrapartida, as receptividades das *transitions* são associadas aos sinais de entrada do sistema de controle, originados a partir de sinais de sensores distribuídos na planta, ou então correspondem a sinais de comando enviados pelo próprio operador.

A Fig. 1.4 ilustra um exemplo de GRAFCET e a representação das ações e receptividades.

Em síntese, os modelos GRAFCET apresentam um comportamento similar às RdP sendo possível um desenvolvimento hierárquico destes modelos, envolvendo os conceitos de *macrosteps* e *macroactions* (DAVID; ALLA [1992]). Estes elementos permitem uma descrição modular, especificando-se o comportamento de cada módulo a partir de refinamentos sucessivos, permitindo a descrição de sistemas de maior porte.

Por sua vez, o SFC - Sequential Flow Chart - é uma técnica de descrição considerado pelo IEC (International Electrotechnical Committee) como elemento comum

particularmente adequado para a especificação do controle de sistemas dirigidos por eventos (MIYAGI [1996]). Analogamente ao GRAFCET, baseia-se em *steps* e *transitions* e seu comportamento dinâmico é idêntico. Portanto, trata-se de outra ferramenta consistente derivada de RdP para o controle de sistemas desta natureza.

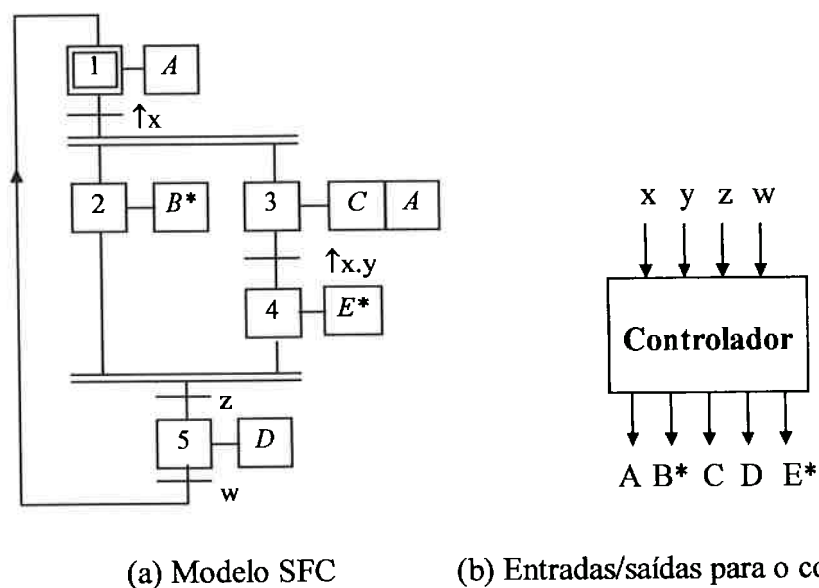


Fig. 1.4 Exemplo de modelagem em SFC

## 1.2 CONTROLE DE SISTEMAS PRODUTIVOS

O aplicação do conceito de controle automático de processos pode ser estendida para a situação em que o objeto de controle é um sistema produtivo dinâmico dirigido por eventos e classificado, mais especificamente, como um Sistema a Eventos Discretos - SEDs (HO [1989], SANTOS FILHO; MIYAGI [1991]). Neste contexto, a atividade de realização do controle em um ambiente de manufatura flexível está fortemente vinculada ao grau de automação pertinente a este sistema.

Controlar o sistema traduz-se em avaliar os aspectos decisórios relacionados com as estratégias de controle a serem obedecidas em um ambiente onde existe uma intensa heterogeneidade funcional de seus vários elementos constituintes.

De forma sucinta, os sistemas produtivos são constituídos a partir da integração física e/ou virtual de diversas estações de trabalho, linhas flexíveis e células de manufatura, capazes de realizarem uma variedade de processos de forma independente baseado no controle adequado do fluxo de itens concatenado ao sistema.

A permanente evolução tecnológica dos recursos aplicados em sistemas de manufatura automatizada permite uma constante elevação substancial do grau de automação destes sistemas. Uma vez que o conceito de grau de automação reflete-se no grau de autonomia presente nos elementos que constituem um sistema de produção, surge a necessidade de agregar-se uma outra natureza de desafio: a concepção de sistemas reativos (GOMES [1997]). Basicamente, consiste em especificar-se estratégias de controle para permitir que, em determinadas situações, o sistema reaja em resposta a estímulos do mundo exterior.

A exemplo do que significou no passado a presença de autonomia e flexibilidade funcional em sistemas de manufatura para adequarem-se à dinâmica do mercado, atualmente faz-se necessário o desenvolvimento de sistemas que apresentem um comportamento reativo e considerem ainda o problema de integração do conhecimento humano e a interação do operador humano na dinâmica do sistema (sistemas antropocêntricos).

O fato do Mark Flow Graph (HASEGAWA [1984], MIYAGI [1996]) - MFG - derivado de redes de Petri (combinando a generalização de RdP ordinárias, suas reduções e



extensões e o caráter prático do GRAFCET, SFC), ser capaz de representar o comportamento dinâmico de sistemas a eventos discretos, permitindo a representação de paralelismos, seqüenciamentos e concorrência de eventos, faz com que esta técnica se constitua em uma forma de modelagem efetiva para a representação formal e realização do controle destes sistemas. Entretanto, verifica-se a existência de uma limitação quanto à eficiência do processo de modelagem de sistemas em MFG que apresentam maior grau de complexidade em sua dinâmica em virtude da flexibilidade operacional que apresentam, exigindo a concepção de regras de controle mais elaboradas. Para representar-se as regras de controle de forma consistente a partir dos recursos disponíveis nesta ferramenta, é necessário abstrair diversos subgrafos que devem ser sincronizados ao modelo geral do processo, dificultando a interpretação do mesmo.

Estes pontos motivaram a proposta de extensões ao MFG no sentido de ampliar seu poder de modelagem de sistemas produtivos.

Em relação ao desenvolvimento racional e estruturado de modelos MFG de sistemas produtivos foi desenvolvido o PFS - Production Flow Schema (MIYAGI [1996]) e em relação aos recursos de modelagem do MFG foi desenvolvido o E-MFG - Mark Flow Graph Estendido (SANTOS FILHO [1995a]) que introduz o conceito de marcas individuais e regras adicionais para o controle do disparo das transições.

Esta técnica concilia as vantagens disponíveis em uma ferramenta de nível mais alto, possibilitando uma descrição mais simples e consistente das características dinâmicas específicas dos sistemas produtivos flexíveis dirigidos por eventos, mas que resguarda as propriedades das redes de Petri do tipo condição-evento (VALETTE [1986]) para a realização efetiva do controle. Em virtude de manipular marcas individuais e suportar

regras específicas para o disparo das transições, é possível elaborar-se estratégias de controle que não se limitam a obediência de uma simples seqüência de atividades pré-determinadas. Outrossim, possibilita a representação do conhecimento adequado para garantir um maior grau de autonomia e eficiência nas situações em que o sistema atinge um estado não previsto em sua trajetória de estados pré-estabelecida, permitindo a inserção de reatividade no sistema.

### **1.3 OBJETIVOS E ETAPAS DO TRABALHO**

O objetivo central deste trabalho consiste em desenvolver um estudo que aborda os procedimentos básicos para o projeto de sistemas de controle de sistemas de produção em que se considera a interação do elemento humano na evolução dinâmica do sistema (sistemas antropocêntricos de produção).

Neste sentido, aborda-se os aspectos relacionados à modelagem do sistema a ser controlado e à modelagem das estratégias de controle a serem executadas. Para isto considera-se:

- Os recursos disponíveis.
- O elenco de processos a serem realizados.
- O sistema de transporte responsável pelo fluxo de materiais que integra o sistema.
- A interação do elemento humano em sua dinâmica.

Assim, o presente trabalho foi conduzido nas seguintes etapas:

A) Em relação ao estudo da especificação e modelagem do sistema global

Consideração de uma abordagem genérica para modelagem das várias partes do sistema desenvolvendo o modelo segundo critérios de prototipagem (blocos em azul na Fig. 1.5).

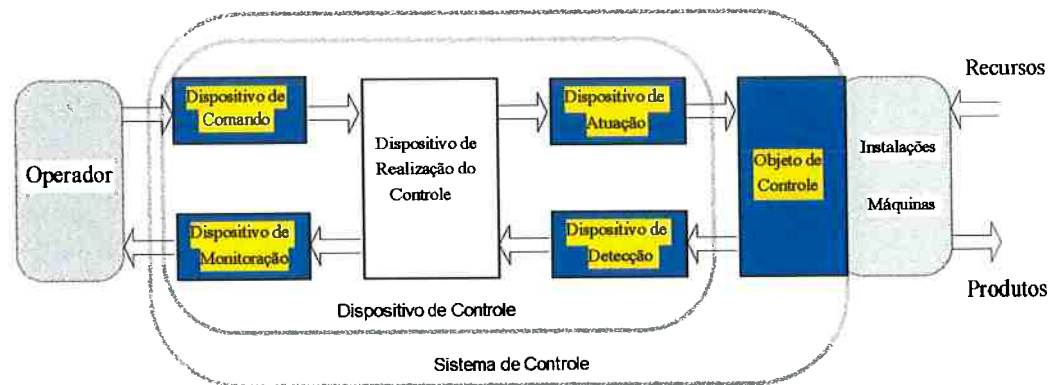


Fig. 1.5 Partes de um sistema produtivo

B) Em relação à especificação do controle de processos

- Desenvolvimento do modelo do sistema de controle através de grafos livres de contato (MIYAGI [1996]).

- Definição de um modelo da parte de controle representando consistentemente o “fluxo vertical” de informações entre níveis hierárquicos (se existirem) e o objeto de controle, de acordo com a Fig. 1.6.
- Desenvolvimento de um procedimento para a especificação de um sistema de controle que evite que o sistema alcance estados em que há a ocorrência de travamento no sistema (bloqueio das ações do sistema).

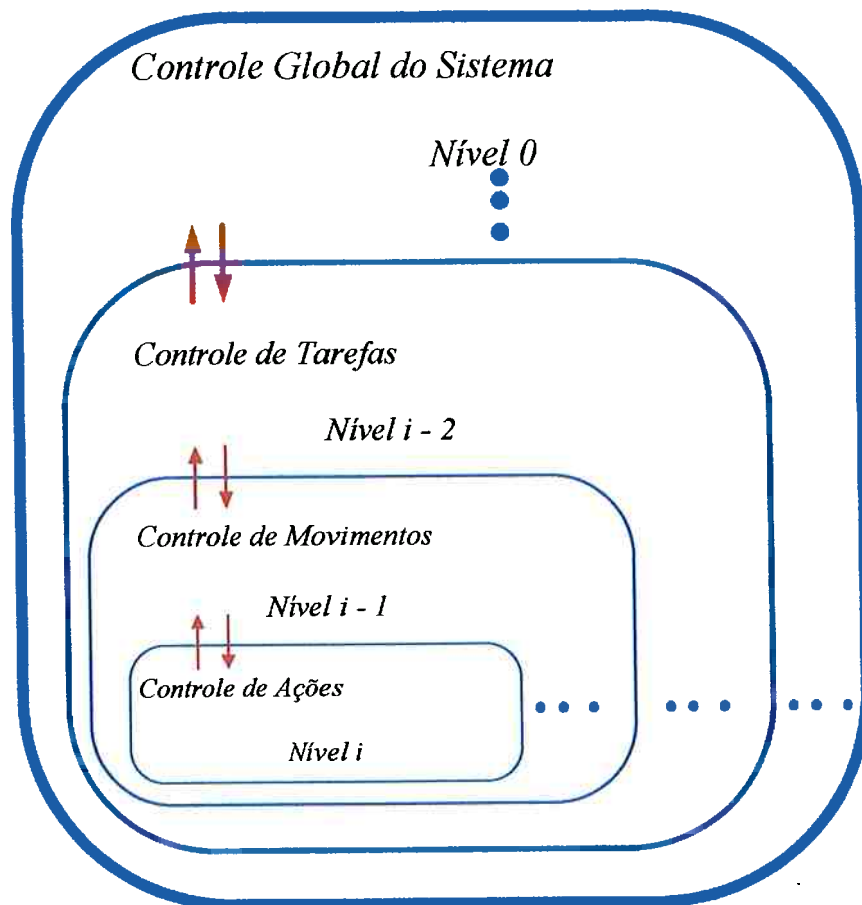


Fig. 1.6 Representação do fluxo vertical de informações

C) Em relação ao estudo de um caso prático (sistemas de transporte)

Proposta de algoritmos de controle que mantenham os veículos de transporte de um sistema antropocêntrico de produção dinâmica e estrategicamente posicionados de maneira que o tempo de atendimento e a distância percorrida sejam minimizados.

D) Em relação à generalização de um conjunto de procedimentos para o projeto de sistemas de controle

Proposta de uma extensão da metodologia proposta em MIYAGI [1996] para o desenvolvimento de sistemas de controle de sistemas antropocêntricos de produção.

## **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

No Capítulo 2 apresenta-se o conceito de sistemas produtivos, agregando a abordagem de sistemas antropocêntricos para descrição e análise do comportamento dinâmico destes sistemas. Em seguida, realiza-se uma breve discussão a respeito das necessidades de uma ferramenta capaz de modelar estes sistemas e prossegue-se, apresentando um conjunto de técnicas, procedimentos e metodologias baseadas no:

- MFG -Mark Flow Graph - (HASEGAWA et al. [1984]) e no E-MFG - Enhanced Mark Flow Graph - (SANTOS FILHO; MIYAGI [1995a]) para a especificação funcional do controle e;

- PFS - Production Flow Schema - (MIYAGI [1996]) e PFS-R - Production Flow Schema and Resources (MIYAGI et al. [1998]) para a descrição dos níveis conceituais da estrutura do sistema de controle.

O Capítulo 3 apresenta inicialmente um levantamento a respeito da evolução das arquiteturas de controle em sistemas produtivos. A seguir, discute-se as formas de representação do controle de sistemas antropocêntricos de produção em E-MFG, incluindo a representação das funções de controle elementares e dos vários tipos de intertravamentos. Para sistematizar o processo de modelagem do controle em E-MFG, apresenta-se um procedimento para representar formalmente uma seqüência de produção de cada produto, e os recursos alocados durante as várias etapas de cada processo. Finalizando, no sentido de ampliar o poder de modelagem do E-MFG, a técnica PFS-R/E-MFG é utilizada para o projeto de sistemas de controle de sistemas antropocêntricos de produção.

O Capítulo 4 apresenta inicialmente um levantamento dos problemas de gerenciamento do fluxo de materiais em sistemas antropocêntricos de produção. A seguir, define-se criteriosamente a situação de 'deadlock' do fluxo de itens (material e/ou informação), para analisar-se o problema de movimentação de materiais entre estações de trabalho. Para a solução deste problema são utilizados grafos do tipo requisição/alocação (HASEGAWA [1996], CHO et al. [1995]) que se constituem na ferramenta básica para a síntese de um procedimento de projeto de compensadores que evitam situações de 'deadlock' desta natureza. Finalizando, é proposto um procedimento que estabelece um conjunto mínimo de compensadores para serem adicionados no controle do sistema.

O Capítulo 5 apresenta o caso prático do controle de um sistema antropocêntrico de produção: um sistema de transporte. Inicialmente é discutida uma especificação detalhada do problema de alocação de veículos de transporte (VTs) e uma descrição das principais abordagens relacionadas ao problema do transporte ao nível de supervisão de tarefas. Em seguida, é proposta uma estrutura de controle reativa capaz de realizar a alocação mais adequada dos VTs. Em relação ao sistema de controle propõe-se uma técnica de mapeamento dos pontos de estacionamento dos VTs onde se realiza um particionamento do sistema produtivo em regiões produtivas. Finalizando, são desenvolvidos os algoritmos de controle que buscam uma solução ótima de alocação dos VTs em tempo real.

No Capítulo 6 descreve-se um conjunto de procedimentos que é agregado à metodologia de projeto de sistemas de controle proposta por MIYAGI [1996] no sentido de adaptá-la para o projeto de sistemas antropocêntricos de produção.

No Capítulo 7 as principais conclusões e sugestões para a evolução deste trabalho são descritas.

Há também um conjunto de quatro Anexos com a seguinte finalidade:

- Anexo A. Descreve um exemplo de aplicação da metodologia PFS/MFG para a especificação do sistema de controle de uma rampa de acesso a navios.
- Anexo B. Apresenta o conceito relacionado ao problema de designação e o algoritmo aplicado para otimizar a alocação dos veículos de transporte disponíveis para atender as demandas existentes.

- Anexo C. Descreve um exemplo do procedimento de alocação de VTs em que se aplica a metodologia PFS-R/E-MFG para a modelagem, análise e controle de sistemas de transporte.
- Anexo D. Apresenta um exemplo de aplicação dos procedimentos para o projeto de sistemas de controle de sistemas de produção antropocêntricos.



## CAPÍTULO 2

# SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS DE PRODUÇÃO (SAP) E SUA MODELAGEM

Como citado no Capítulo 1 a reestruturação organizacional necessária para manter a competitividade de uma empresa implica em considerar-se como premissas básicas a manutenção de níveis elevados de autonomia e flexibilidade operacional, qualidade, garantia de atendimento de prazos de entrega cada vez menores e a capacidade de produzir uma variedade extensa de produtos compatíveis com as necessidades de um mercado de consumidores que valorizam a versatilidade de opção de variantes de produtos (VALLE [1995], GUNASEKARAN [1997]).

Uma possível abordagem para a concepção de sistemas de produção que atendam a estas necessidades corresponde à proposta de uma arquitetura de sistema antropocêntrico de produção (ITO [1991]). Nestas estruturas valoriza-se o elemento humano como parte integrante do sistema de produção que intervém na sua evolução dinâmica, utilizando-se a capacidade destes operadores para tomar decisões para flexibilizar e otimizar a funcionalidade destes sistemas (KOVÁCS; MONIZ [1995]).

Este Capítulo apresenta o conceito de sistemas produtivos, agregando o conceito de sistemas antropocêntricos para introduzir a classe de sistemas antropocêntricos de

produção. Em seguida, realiza-se uma breve discussão a respeito das necessidades de uma ferramenta capaz de modelar a funcionalidade destes sistemas e prossegue-se apresentando um conjunto de técnicas, procedimentos e metodologias baseadas no MFG - Mark Flow Graph - (HASEGAWA et al. [1984]), E-MFG - Enhanced Mark Flow Graph - (SANTOS FILHO; MIYAGI [1995a]), PFS - Production Flow Schema - (MIYAGI [1996]) e PFS-R - Production Flow Schema and Resources (MIYAGI et al. [1998]) que estabelece uma correspondência entre a etapa de um processo e o recurso alocado. Por fim, apresenta-se a proposta de um procedimento para o desenvolvimento de modelos referentes à especificação do comportamento dinâmico de sistemas antropocêntricos de produção.

## 2.1 COMPORTAMENTO BASEADO EM EVENTOS

Os sistemas produtivos (antropocêntricos ou não) são essencialmente dirigidos por eventos (HO [1989], SANTOS FILHO; MIYAGI [1991]) de maneira que a ocorrência de um evento provoca uma alteração das condições dos recursos disponíveis, provocando, desta forma, a evolução dinâmica do sistema. Este comportamento caracteriza-se por apresentar:

- Assincronismo quanto à ocorrência de eventos;
- Paralelismo de eventos;
- Conflito entre eventos e;
- Ordenação parcial de eventos.

Por sua vez, estas características delineiam o seguinte comportamento para estes sistemas:

- Possuem condições locais distribuídas de acordo com os recursos disponíveis no sistema.
- Estas condições podem ser tratados por variáveis discretas (como variáveis lógicas).
- A ocorrência de eventos está diretamente relacionada às condições dos recursos do sistema estabelecendo uma relação do tipo *causa-efeito*.
- As condições do sistemas são atualizadas de acordo com a ocorrência dos eventos a que estiverem diretamente relacionadas.
- O estado global é representado univocamente a partir da combinação destas condições.

É perfeitamente cabível estender-se a abordagem de sistemas dinâmicos dirigidos por eventos para sistemas computacionais, redes de comunicação, sistemas de tráfego, entre outros, uma vez que são considerados sistemas concebidos pelo homem e a lógica de sua evolução dinâmica também é definida por regras estabelecidas pelo projetista, independente de leis invariantes da Física (HO [1989], MIYAGI [1996]).

De uma forma genérica, os sistemas produtivos na área de manufatura são sistemas flexíveis que pretendem atender as necessidades de produção de um amplo espectro de produtos, envolvendo o controle de uma variedade de processos, buscando otimizar custos e atender os prazos de entrega de acordo com os planos de produção previamente

estabelecidos. Entretanto, à medida em que estas características passam a fazer parte destes sistemas, faz-se necessário aprimorá-las para manter um padrão de competitividade entre as empresas.

Otimizar estas características pode representar uma completa reestruturação tecnológica, estratégica e cultural para garantir uma estratégia incremental de modernização (VALLE et al. [1995]). É neste contexto que se insere uma abordagem antropocêntrica para tratar-se o problema.

## **2.2 ABORDAGEM ANTROPOCÊNTRICA**

Atualmente, o comportamento dinâmico que caracteriza os sistemas produtivos de última geração baseia-se fortemente em características de elevada autonomia e flexibilidade operacional para atender à constante alteração das necessidades de mercado e utilização racional do potencial humano no que se refere a sua capacidade de desenvolver e aprimorar soluções para as necessidades de sistemas construídos pelo homem e para si próprio (ITO [1991], VALLE et al. [1995]). Considerando estes aspectos preconiza-se a aplicação do conceito de sistemas antropocêntricos. Ainda não há uma unicidade em relação à definição desta classe de sistemas. Em KOVÁCS; MONIZ [1995] há uma descrição de várias definições relevantes.

Genericamente, estes sistemas pretendem valorizar a integração do elemento humano como especialista capaz de participar dos processos de tomada de decisão. Desta forma, novas tecnologias são desenvolvidas no sentido de considerar a capacidade humana

como elemento significativo para o planejamento de estruturas organizacionais com integração e interação com o homem no controle de processos produtivos.

Há um conjunto de características fundamentais que identificam estes sistemas. A saber:

- São sistemas em que há uma alteração de enfoque de maneira que a abordagem baseada em automação total (tecnocêntrica) é substituída por outra baseada em sistemas inteligentes com interação humana.
- São sistemas concebidos e construídos pelo homem e, apesar de apresentarem um determinado grau de autonomia, existem níveis de projeto, controle e gerenciamento cuja interação com e entre homens é fundamental e não pode ser desconsiderada.
- Geralmente, apresenta uma estrutura produtiva descentralizada, cuja orientação organizacional baseia-se nos produtos, prevendo uma utilização eficiente de recursos e que se ajuste rápido a alterações de demanda.
- Estes sistemas visam não somente um nível de produção eficiente e competitivo, mas também uma produção de bens que sejam mais adequados às aspirações subjetivas dos operadores, considerando-se aspectos sócio-econômico-culturais dos ambientes nos quais se inserem.

É importante enfatizar que a abordagem antropocêntrica é apenas uma possível alternativa que pode ser considerada para tratar os problemas de competitividade e necessidade de flexibilidade nos sistemas produtivos atuais. Existem várias outras propostas, tanto técnicas como organizacionais, para incrementar a competitividade das empresas.

A estratégia centrada na tecnologia consiste em outra abordagem que se fundamenta no princípio de que a sofisticação tecnológica baseada em modelos hierárquicos centralizados é a solução. Esta estratégia considera a tecnologia como um meio de substituir progressivamente o trabalho humano por dispositivos automáticos, condizente com um cenário de substituição de especialistas. A Tabela 2.1 estabelece um paralelo entre as duas abordagens.

Nos sistemas antropocêntricos há uma preocupação em integrar-se as tarefas de planejamento, programação, processamento e manutenção, principalmente quando o sistema em estudo possui um elevado nível de automação. Neste contexto, o trabalho é estruturado em grupos de elevada autonomia centrados no processamento de um determinado produto, ou então de um pequeno grupo de produtos. As tarefas de um grupo resumem-se em planejar e alocar os serviços de carregamento, processamento e descarregamento nas máquinas, assim como executar o controle de qualidade, programação e manutenção.

De acordo com KOVÁCS; MONIZ [1995] os resultados obtidos a partir de diversos experimentos comprova que um sistema de produção antropocêntrico conduz a um aperfeiçoamento dos níveis de produtividade, qualidade e eficiência. Entretanto, diversos aspectos devem ser considerados antes de tentar-se generalizar estas vantagens evidenciadas. Por exemplo, o tipo de produção, o porte da empresa, o tipo de organização, a experiência de gerenciar-se recursos humanos e a existência de especialistas treinados são fatores fundamentais.

Tabela 2.1 Comparação entre as abordagens tecnocêntrica e antropocêntrica.

	<b>Abordagem Tecnocêntrica</b>	<b>Abordagem Antropocêntrica</b>
<i>Quanto aos Objetivos</i>	Introdução de novas tecnologias com a intenção de reduzir a participação de operadores humanos no chão de fábrica e nos custos de produção.	Introdução de novas tecnologias que valorizem a capacidade humana, aprimorando a flexibilidade funcional do sistema, bem como a qualidade dos produtos.
<i>Quanto a Participação do Homem</i>	Substituição de especialistas por tecnologia, distanciando o elemento humano do chão de fábrica.	Preocupação em utilizar-se novas tecnologias para aprimorar os recursos que integram o elemento humano em todos os níveis do sistema.
<i>Quanto à Estrutura</i>	Soluções baseadas em estruturas centralizadas hierárquicas.	Soluções baseadas em estruturas distribuídas cooperativas.
<i>Quanto à forma de Interação entre as partes do sistema</i>	Estrutura centralizada rígida havendo uma partição horizontal e vertical das tarefas em diferentes níveis de especialização de conhecimento para a operação do sistema.	Estrutura descentralizada flexível, havendo integração vertical e horizontal de tarefas permitindo a coexistência de princípios de participação e cooperação
<i>Quanto às Atividades a nível de Operação</i>	Execução de tarefas simples a nível de operação.	Capacidade de realizar tarefas complexas, resolver problemas, utilizar a criatividade e autonomia individualmente ou em grupos de trabalho.
<i>Quanto à Integração de Empresas</i>	Sistema informatizado e centralizado de informações, decisões e controle.	Integração das empresas por partes, considerando aspectos relativos ao treinamento, cooperação e acesso às informações para a tomada de decisões e controle, considerando a autonomia de cada uma das partes do sistema.

Baseado nos aspectos apresentados, partindo-se do pressuposto que a meta principal deste trabalho é tratar sistemas produtivos com elevada autonomia e flexibilidade operacional, cujo comportamento dinâmico depende fortemente da interação com operadores e especialistas, a aplicação de uma abordagem antropocêntrica durante toda a

fase de especificação, modelagem e controle destes sistemas; principalmente no que se refere à integração do especialista e/ou de seus conhecimentos nos processos de decisão e controle; que também envolvem operadores humanos, mostra-se como uma alternativa consistente no sentido de desenvolver técnicas capazes de gerar modelos mais efetivos para o projeto destes sistemas.

Portanto, considerando o escopo deste trabalho, utiliza-se como definição genérica de sistemas antropocêntricos de produção a definição 2.1.

**Definição 2.1.** Sistema antropocêntrico de produção (SAP) é um sistema produtivo que incorpora novas tecnologias capazes de valorizarem a capacidade operacional e o conhecimento humano específico para a especificação, interpretação e controle da evolução destes sistemas durante todo o ciclo de vida do sistema.

### **2.3 PREMISSAS PARA A MODELAGEM DE SAP**

Em princípio, se o propósito for modelar sistemas produtivos antropocêntricos dirigidos por eventos, é possível classificar-se estes modelos de acordo com a natureza da análise que se pretende realizar e de acordo com o nível de detalhamento das informações de controle que estão sendo tratadas. Considerando estas hipóteses, os modelos podem ser classificados em duas categorias básicas:

- Modelos de natureza lógica e qualitativa.
- Modelos de medida de desempenho.



O desenvolvimento de SAP implica no tratamento de uma variedade ampla de tarefas a serem realizadas pelo sistema, envolvendo concorrência e conflito de atividades, agregação e compartilhamento de um número finito de recursos e um complexo espectro de atividades funcionais inerentes ao comportamento dinâmico pretendido para o mesmo, considerando ainda a presença de elementos humanos que podem gerar eventos que atuam sobre a evolução dinâmica do sistema. Portanto, a cada etapa de desenvolvimento do sistema depara-se com necessidades diferentes que englobam os seguintes requisitos:

- Descrição conceitual do sistema correspondente à fase de especificação.
- Descrição funcional do sistema a nível de tarefas.
- Descrição detalhada do comportamento dinâmico do sistema a nível de máquina.
- Descrição detalhada das interfaces de monitoração e atuação que permitem avaliar o estado global do sistema e gerar eventos para o seu controle.
- Análise para validação do comportamento dinâmico dos modelos do sistema e seu controle.
- Análise do desempenho do sistema.
- Implementação lógica e física do sistema.

Uma vez que, em princípio, estas atividades implicam em utilizar-se técnicas de naturezas variadas mas, compatíveis com a natureza do modelo associado a cada etapa do processo de desenvolvimento, observa-se uma séria limitação nas propostas existentes

para integrar-se todas estas técnicas em um mesmo ambiente de desenvolvimento, sem que ocorram os problemas decorrentes da existências de ‘gaps’ semânticos entre as várias abordagens.

Basicamente, são estas as característica fundamentais que qualificam uma ferramenta como sendo adequada para a modelagem de sistemas desta natureza:

- Capacidade de representação de características como causalidade, sincronização de eventos, compartilhamento de recursos, conflitos, sequenciamento e paralelismo de atividades.
- Representação unívoca de estados e eventos permitindo modularização e refinamento.
- Representação de estados distribuídos, permitindo uma descrição dos estados locais.
- Capacidade de uma descrição seletiva do comportamento dinâmico do sistemas e suas partes representando de forma consistente o “fluxo vertical” de informações de controle entre os diferentes níveis de detalhamento funcional.
- Possibilidade de gerar-se modelos interpretados em que é possível associar-se aos itens do modelo as entidades físicas do mundo externo ou ainda modelar-se globalmente as várias partes do sistemas integrando estas partes por intermédio de um fluxo consistente de informações, representando concretamente as interfaces de comando e monitoração.

- Adequação para a utilização de técnicas de prototipagem durante todo o ciclo de desenvolvimento do sistema.
- Representação gráfica que facilite a documentação, monitoração da dinâmica, manutenção e atualização do sistema.
- Formalismo matemático adequado para permitir a análise qualitativa e quantitativa do modelo e especificação de estratégias de controle que se fizerem necessárias.

Baseado nestas prerrogativas e nas considerações do Capítulo 1, as próximas seções descrevem técnicas, procedimentos e metodologias consideradas para o desenvolvimento de sistema produtivos antropocêntricos.

#### **2.4 FUNDAMENTOS DO MFG**

O MFG (HASEGAWA et al. [1984], MIYAGI [1996]) é uma rede interpretada derivada de redes de Petri (PETERSON [1981], REISIG [1985], REISIG [1992]) desenvolvida para a modelagem e controle de sistemas. O MFG é composto basicamente pelos seguintes elementos estruturais (vide Fig.2.1):

- a) As transições que indicam a ocorrência de eventos;
- b) Os boxes que representam as pré e pós-condições;
- c) Os arcos orientados que estabelecem uma relação causal entre os eventos e as condições;

- d) As portas que habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos e;
- e) As marcas que indicam a manutenção de uma condição.

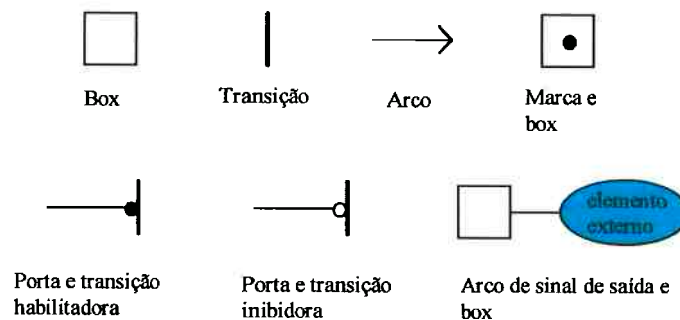


Figura 2.1 Elementos básicos do MFG

No processo de modelagem de um SAP, os boxes representam as condições, operações ou tarefas associadas aos dispositivos e as transições representam o início e término de um processo. O comportamento dinâmico do sistema é indicado pela evolução das marcas no grafo, de acordo com uma regra pré-definida de disparo das transições e que correspondem ao fluxo de itens (materiais ou informações) no sistema real.

Para representar o interfaceamento do modelo do sistema com o sistema real existem ainda dois elementos estruturais: os arcos de sinal de saída e as portas habilitadoras/inibidoras. No caso das portas, ainda há uma classificação em portas externas ou internas, dependendo da natureza do sinal de origem.

## 2.5 MARK FLOW GRAPH ESTENDIDO (E-MFG)

O E-MFG é uma técnica de modelagem que permite a manipulação de marcas individuais com atributos, sendo capaz de modelar e controlar alterações de fluxo (rotas alternativas) das marcas e seleção de tarefas (condições) associadas aos boxes. A estrutura básica do grafo MFG e de seus principais elementos é mantida. A concepção de marcas com atributos fundamenta-se na teoria de ‘Tagged MFG’ (YOSHIDA [1988]). Neste sentido, procurou-se manter as regras básicas de manipulação dos atributos. Para a inclusão de regras adicionais de disparo das transições, o desenvolvimento do trabalho baseia-se na teoria de  $\phi$ -net (FUJI ELETRIC [1989]). Apresenta-se a seguir os elementos estruturais fundamentais do E-MFG e a dinâmica de disparo das transições e atualização da marcação (SANTOS FILHO [1993], SANTOS FILHO; MIYAGI [1995a]).

### 2.5.1 As Marcas Individuais

Neste caso, os elementos estruturais básicos apresentados na Fig. 2.1, constituem um caso particular em que não há marcas individuais e não há regras adicionais associadas às transições. No E-MFG as marcas são acompanhadas por um vetor de atributos que lhes garantem individualidade. A estes atributos pode-se associar diversas informações referentes ao produto, ao processo e ao controle. O atributo zero, significa a ausência deste atributo. A Fig. 2.2 representa um exemplo de estrutura de uma marca individual.

$$\text{Marca } \bullet = \langle a1, a2, a3, a4 \rangle$$

onde,

$$\left\{ \begin{array}{l} a1 = \text{tipo de peça} \\ a2 = \text{encomenda} \\ a3 = \text{origem} \\ a4 = \text{destino} \end{array} \right.$$

Figura 2.2 Exemplo de estrutura de uma marca individual

### 2.5.2 Marcas Individuais Compostas

No sentido de modularizar o MFG, foram propostos macro-elementos para simplificar a representação de diversos dispositivos comuns presentes no ambiente de manufatura. Assim, foi introduzido o MFG Funcional (HASEGAWA et al. [1984]) que agrega vários macro-elementos estruturais do MFG. Neste caso, os boxes funcionais do tipo capacidade, agrupador e dispersor manipulam apenas marcas indistintas, isto é, um box agrupador ou dispersor ou mesmo capacidade controlam apenas a quantidade de peças na situação em que, respectivamente, se modela, por exemplo, um processo de empacotamento, ou desempacotamento, ou ainda um 'buffer' de armazenamento temporário em um sistema de manufatura. No caso de utilizar-se marcas individuais nestes boxes, é possível controlar também a seqüência de entrada e saída de materiais e registrar-se o conteúdo das cargas. Quando se modela processos de agrupamento (montagem, carga, etc.) e dispersão (desmontagem, descarga, etc.) através de boxes agrupadores e dispersores em E-MFG, a marca que representa o conjunto de itens é denominada marca individual composta. Esta denominação justifica-se pela sua estrutura que armazena a informação de cada item antes do agrupamento, ou então distribui a

informação para cada item após a dispersão. Estas informações armazenadas são representadas por um atributo adicional, através de um código de controle. A Figura 2.3 ilustra a representação dos boxes funcionais tipo agrupador, dispersor e capacidade e um exemplo de marca individual composta.

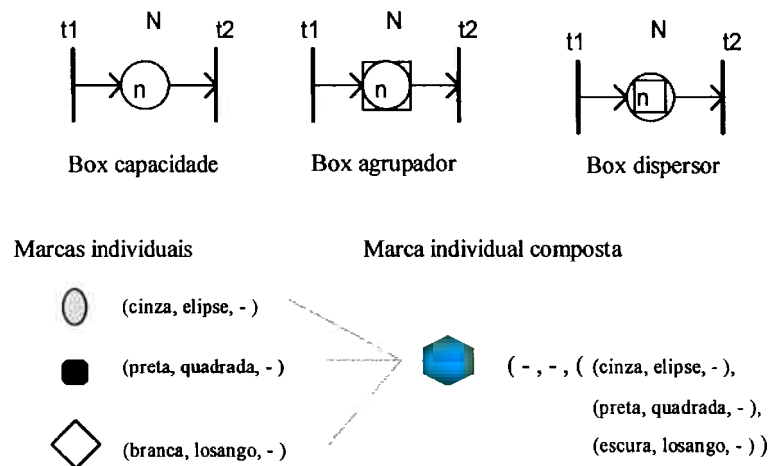


Fig. 2.3 Os boxes funcionais básicos e um exemplo de marca individual composta

### 2.5.3 Manipulação dos Atributos das Marcas

O problema de manipulação dos atributos associados às marcas pode ser interpretado de duas maneiras. Ou podem ser modificados através de *alterações condicionadas*, ou através de *filtragens seletivas*.

A *alteração condicionada* significa que os estados dos atributos podem ser alterados dependendo do estado presente destes próprios atributos da marca, realizando-se desta forma a função de atualização do estado do sistema. Esta tarefa é executada por um

outro box funcional denominado *box controlador*. Este box é assim denominado porque exerce a função de controlar o estado dos atributos de uma marca, no sentido de atualizar o estado global do sistema a partir da manutenção do estado local representado por cada uma destas marcas. Regras de produção do tipo ‘if...then...’ são aplicadas para a verificação e atualização dos atributos previamente especificados. A Figura 2.4 ilustra um exemplo de box controlador alterando os atributos de uma marca.

Outra forma de alterar-se os atributos de uma marca corresponde à *filtragem seletiva*. Neste caso, são estabelecidos os campos correspondentes aos atributos que devem ou não acompanhar a marca, após o disparo de uma transição. Esta especificação é realizada através de inscrições nos arcos orientados. É importante observar que as inscrições não representam restrições para a habilitação da transição que possui este arco orientado do lado de entrada. Ao invés disso, representa restrições de quais campos de atributo devem ou não ser transmitidos. A Figura 2.5 representa a atuação do procedimento *filtragem seletiva*. A inscrição variável *a1* sobre o arco de entrada da transição *t1* determina que apenas o atributo correspondente ao primeiro elemento do vetor de atributos que acompanha a marca individual deve ser mantido, enquanto os demais não são transmitidos.

#### 2.5.4 Dinâmica das Regras de Disparo

A dinâmica de disparo de uma transição é estabelecida por regras de decisão segundo uma determinada hierarquia - a exemplo do que ocorre em  $\phi$ -nets (FUJI ELETRIC [1989]) - que estabelece três níveis hierárquicos de decisão.



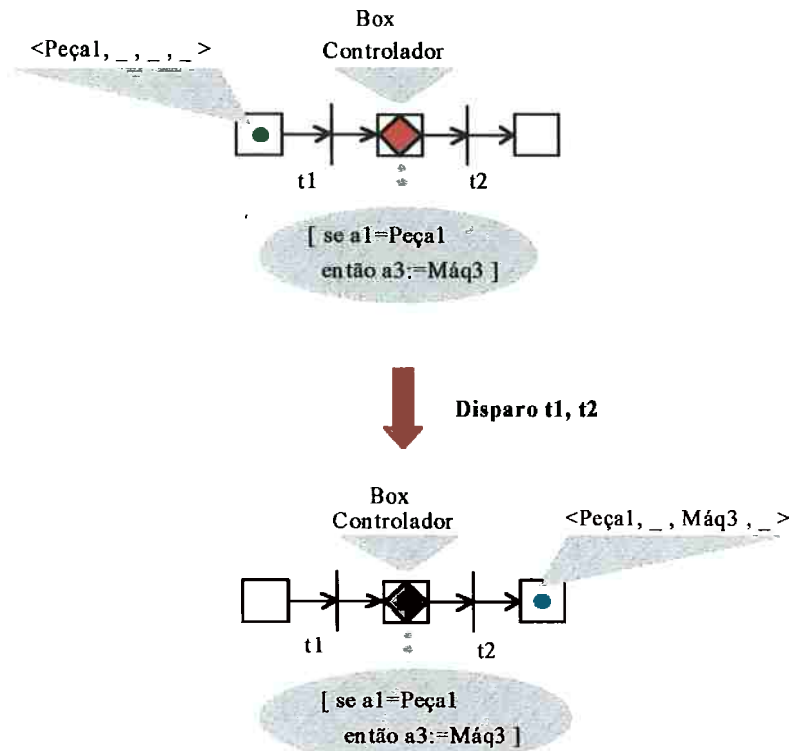


Fig. 2.4 Representação de um box controlador alterando o estado de uma marca individual

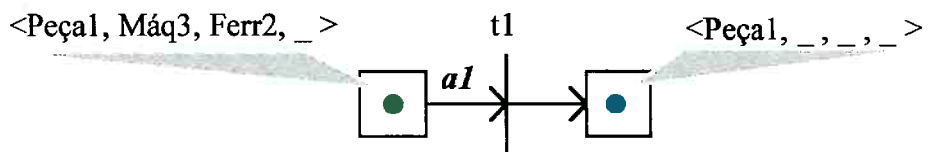


Fig. 2.5 Representação de um procedimento de *filtragem seletiva*

O primeiro nível corresponde às regras de restrições adicionais de disparo que são regras do tipo ‘se-então’ de sistemas de produção, necessárias para a representação de

estratégias de controle específicas. A especificação destas regras é realizada através de inscrições nas transições. Se não houver inscrições em uma transição, não há regras adicionais que limitem o seu disparo. Uma transição que satisfaz as regras de restrições adicionais é denominada *transição em prontidão*.

O segundo nível corresponde às regras de habilitação de disparo. Uma transição é denominada *transição habilitada* se for uma *transição em prontidão* que satisfaz as seguintes condições:

- a) Não existe box no lado de saída com marcas;
- b) Não existe box no lado de entrada sem marcas ou com marcas com restrições;
- c) Não existe porta habilitadora (interna ou externa) que esteja no estado de desabilitação;
- d) Não existe porta inibidora (interna ou externa) que esteja no estado de inibição.

O terceiro e último nível corresponde às regras de realização de disparo propriamente ditas. Estas regras correspondem à verificação das regras de arbitragem<sup>1</sup> em situações que envolvem conflito<sup>1</sup> e a verificação das regras de filtragem seletiva dos atributos, de acordo com as inscrições nos arcos orientados. Uma *transição habilitada* que atende as regras de realização de disparo denomina-se *transição disparável*.

Uma *transição disparável* dispara imediatamente, fazendo com que as marcas fluam pelo grafo, descrevendo o comportamento dinâmico do sistema, a exemplo do que já se

---

<sup>1</sup> Estes conceitos serão abordados em detalhes no Capítulo 3.

realizava no MFG. A Figura 2.6 ilustra um grafo E-MFG em que ocorre o disparo de uma transição e a conseqüente manipulação dos atributos das marcas envolvidas.

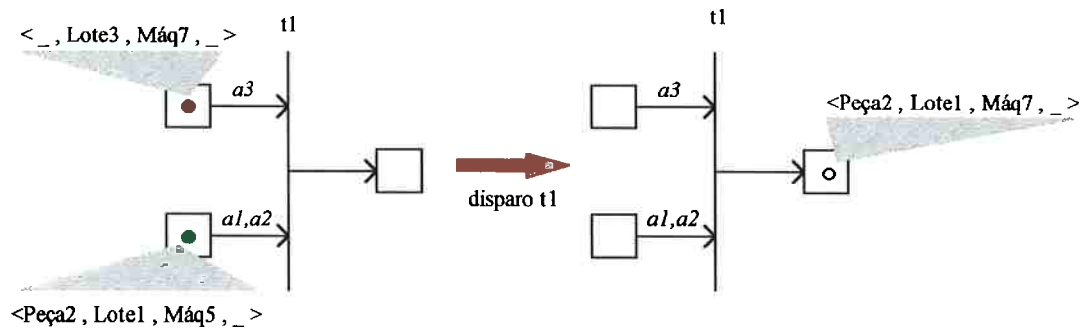


Fig. 2.6 Alteração dos atributos das marcas decorrentes do disparo

## 2.6 PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS) E SEUS ELEMENTOS

O PFS (MIYAGI [1996]) é utilizado para descrever, graficamente e conceitualmente, os processos relacionados com a produção de itens (peças, produtos, informações, etc.) sob a forma de seqüências de *etapas* de atividades e de distribuição. Como indicado na Figura 2.7, o PFS consiste de nós de *elementos-atividade*, nós de elementos distribuidores e arcos de fluxo, que conectam sequencialmente um tipo de nó ao outro.

Os *elementos-atividade*, como ilustrado na Figura 2.8, podem ser expandidos em duas transições e um lugar (*lugar-atividade*). Quando é necessário a indicação do início e da conclusão de uma atividade, distinguimos a transição de entrada (como a transição de início) da transição de saída (como a transição final) (Figura 2.8c). Além disso, na Fig.2.8, *m* e *n* são, respectivamente, os números de entradas e saídas simultâneas de um

elemento; em redes de Petri tipo lugar/transição - L/T - (REISIG [1985], REISIG [1992]) ou em representações híbridas, eles compõem os pesos dos arcos de fluxo. Se não houver necessidade, ou  $m=n=1$ , eles podem ser omitidos.

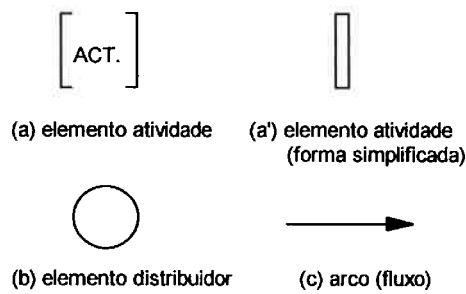


Fig 2.7 Elementos do PFS

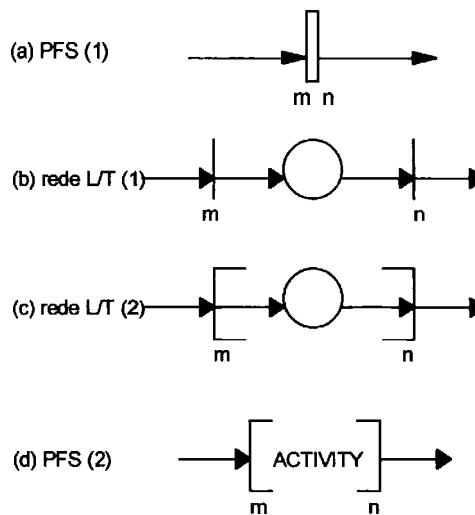


Fig. 2.8 Elemento atividade em rede L/T

Similarmente, um *elemento-distribuidor* pode ser também expandido em um lugar (*lugar-distribuidor*) com transições à entrada e à saída, como ilustrado na Figura 2.9. Ainda, no caso de se expandir dois elementos conectados um ao outro em uma rede L/T, a transição de saída da primeira etapa e a de entrada da etapa seguinte formam uma única transição. Deste ponto em diante, a denominação *lugares-etapa* é dada tanto para os *lugares-atividade* como para os *lugares-distribuidores*.

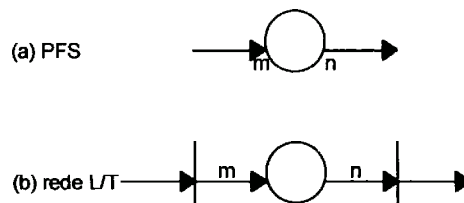


Fig. 2.9 Elemento distribuidor em rede L/T

## 2.7 ALOCAÇÃO DE RECURSOS E SUA MODELAGEM

Uma característica de SAP é a dinâmica de alocação de recursos e os passos do processo produtivo. Qualquer tentativa de análise ou otimização do processo envolve necessariamente a solução do problema de alocação de recursos.

Assim os recursos e suas alocações têm sido objeto de diversos estudos e, neste contexto, apresenta-se a seguir uma síntese do problema de acordo com a abordagem adotada neste trabalho.

Cada recurso que compõe o SAP está relacionado com o andamento (evolução) do processo (em conformidade com o PFS) da seguinte maneira:

- Cada recurso num SAP tem uma função específica, relacionado com a *etapa* do PFS.
- Um processo evolui (avança) sistematicamente com a alocação de unidades de recursos. A quantidade de unidades do recurso equivale à capacidade daquele recurso.
- Uma unidade de recurso ou está sendo utilizada na respectiva *etapa*, ou liberada desta.
- Uma unidade de recurso não pode violar as restrições de utilização estabelecidas para o processo ao qual está associado antes do processo avançar para a *etapa* seguinte.

Estas condições têm sido freqüentemente utilizadas em modelos de Redes de Petri anteriormente estudados para análise de possíveis travamentos no comportamento dinâmico do sistema (por ex.: ZHOU et al. [1992], HSIEH et al. [1993], ESPELETA et al. [1995]).

Dentro das condições mencionadas, podemos classificar as relações estruturais dos recursos existentes em um SAP como segue:

- a) As etapas de atividade sempre correspondem a um recurso ativo tais como operadores, máquinas e dispositivos.
- b) Os elementos distribuidores podem corresponder tanto a recursos ativos como passivos; isto é:

- i) podem corresponder a um recurso passivo, como um 'buffer', ou a um *elemento-atividade* de interrupção temporária, que denota o cessar de atividades entre dois *elementos-atividade* -- uma pausa num lugar específico, correspondendo a um armazenamento temporário ou
- ii) quando o recurso está para ser associado indiretamente. Por exemplo, pode ser um modo de evitar a paralização de um processo dentro de uma *etapa-atividade*.

Quando a *etapa* em si é um recurso, ela representa um recurso móvel tal como operadores robôs móveis, veículos de transporte ou 'pallets', indicando uma condição específica do recurso associado à *etapa*. As correspondências a) e b-i) são definidas como *Correspondência de Etapa (Step Correspondence* ou *S-correspondence*) e a correspondência b-ii) é definida como *Correspondência de Condição (Condition Correspondence* ou *C-correspondence*).

Além disso, há *etapas* que não correspondem a qualquer dos recursos. Por exemplo, as *etapas dummy* que denotam controle ou transformação entre duas atividades e que não têm quaisquer recursos que lhes sejam designados.

Na próxima seção, discute-se a representação gráfica dirigida a estas formas de correspondência num PFS.

### 2.7.1 Correspondência entre *Etapa* e Recurso e *Arco-Recurso*

Considera-se a seguir a questão de como incorporar no PFS a presença de recursos através de um nó. Tal como indicado na Fig. 2.10, representa-se o recurso por um nó de linha grossa e se conecta-o a um elemento de *etapa* através de um arco. Este arco, daqui para frente, é chamado de arco-recurso.

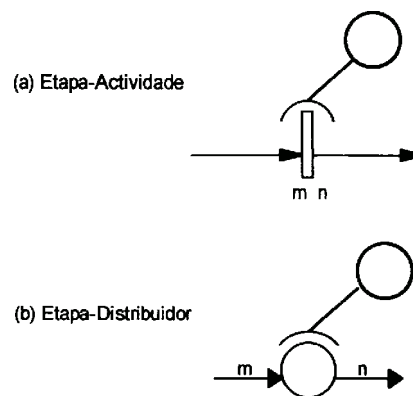


Fig. 2.10 Arco-recurso

### 2.7.2 Rede Híbrida - Rede L/T do PFS-R

Um elemento de *etapa* do PFS pode ser expandido em uma rede L/T. Aplicando isto ao PFS-R da Fig. 2.10, obtém-se a representação híbrida da Figura 2.11(a). A Figura 2.12(b) é a representação sob a forma de rede L/T. Como no caso dos *lugares-etapa*, o nó de recurso, nestas representações, é chamado de *lugar-recurso*. Ainda, processos e unidades de recursos são representados por marcas e as regras de disparo na representação híbrida da Figura 2.11(a) são equivalentes às da rede L/T da Figura 2.11(b).



Na rede L/T da Figura 2.11(b), representamos os pesos dos arcos de fluxo oriundos de um lugar  $p$  (transição  $t$ ) para uma transição  $t$  (lugar  $p$ ) por  $A(p,t)$  ( $A(t,p)$ ). Com respeito aos pesos dos arcos na transformação que acabamos de descrever, estabelecemos as seguintes condições. Na Figura 2.11,  $m = A(t1,p) = A(r,t1)$  e  $n = A(p,t2) = A(t2,r)$ .

O propósito dessas condições é de considerar as marcas num *lugar-recurso* como uma unidade disponível de recurso e uma marca de num *lugar-etapa*, uma unidade de recurso designada para (utilizada em) tal *etapa*; também, tem a função de sempre assegurar a conservação do total de unidades de recursos. Se o peso do arco for igual ou maior que dois, adicionamos este valor ao arco, mas se for um ou não houver necessidade de especificá-lo, pode-se omiti-lo.

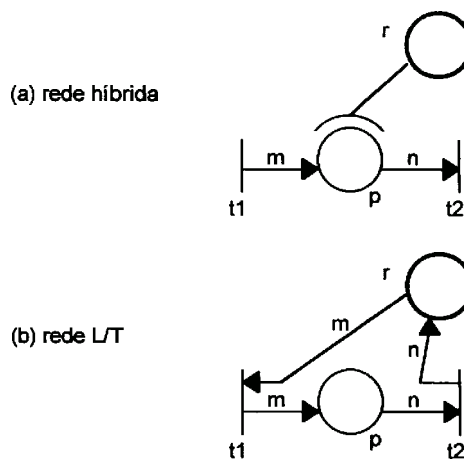


Fig. 2.11 Transformação do PFS-R

Quando um recurso corresponde a dois elementos de *etapa* como indicado na rede híbrida da Figura 2.12(a), a transformação é realizada como ilustrado na Figura 2.12(b).

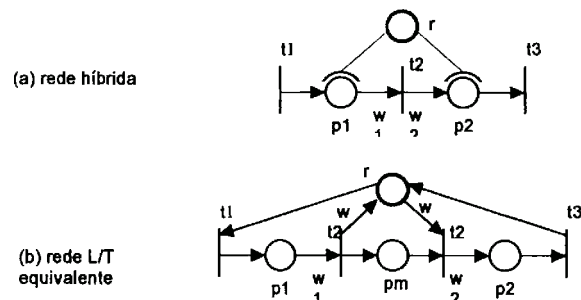


Fig. 2.12 Um recurso para duas etapas em cascata

No entanto, quando a transição  $t_2'$  é uma transição instantânea, a representação resultante será uma dentre as Figuras 2.13(a)~(c), dependendo da diferença entre os pesos dos arcos.

### 2.7.3 Rede Híbrida - PFS-R e E/MFG

O PFS-R é capaz de modelar SAP proporcionando:

- Uma descrição conceitual através de linguagem natural;
- Uma descrição estruturada do sistema a partir de refinamentos sucessivos e;
- Uma interpretação para o modelo detalhado do sistema.

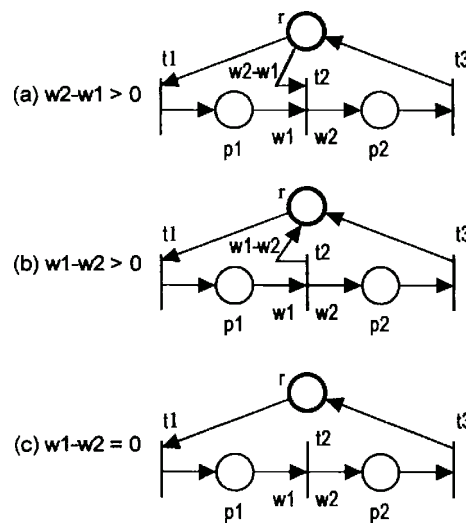


Fig. 2.13 Representação em rede L/T da rede da Fig. 2.12

Assim, é de fundamental importância que esta técnica suporte uma metodologia para orientar a modelagem de sistemas em E-MFG.

Considerando-se a hipótese de que a descrição do comportamento dinâmico de um SAP baseia-se na representação do fluxo de itens presente neste sistema, o PFS-R pode ser aplicado para gerar um modelo conceitual, a exemplo do que foi realizado em MIYAGI [1988] com a ressalva de que com a evolução do poder de modelagem do PFS-R, os recursos podem ser modelados de forma mais consistente sem prejudicar sua estruturação.

Neste contexto, o objetivo é substituir adequadamente os elementos PFS-R por elementos E-MFG. Uma vez que existe uma herança dos elementos básicos do MFG, o processo de descrição do elemento atividade e do elemento distribuidor em E-MFG não é alterado, obedecendo os mesmos princípios.

Há apenas uma limitação em relação às redes híbridas L/T e PFS-R no que se refere ao peso dos arcos. No caso do E-MFG admite-se apenas arcos com peso unitário. Desta forma, a Fig. 2.11 sofre algumas alterações de acordo com a Fig 2.14:

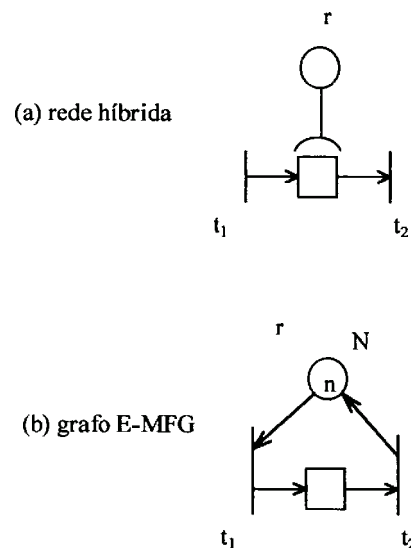


Fig. 2.14 Transformação do PFS-R para o caso E-MFG

Quanto ao aspecto de representação de recursos compartilhados em cascata, uma vez que os pesos dos arcos são unitários, isto corresponde à situação em que a diferença entre  $w_1$  e  $w_2$  é nula na Fig. 2.13. Neste caso, a Fig. 2.15 representa efetivamente o compartilhamento destes recursos.

Portanto, estas técnicas permitem uma modelagem de todos os dispositivos que constituem o SAP, permitindo uma representação de todos elementos presentes no objeto de controle sendo que o conteúdo de um elemento atividade de um determinado nível de abstração pode ser representado por várias sub-atividades interligadas por elementos distribuidores em um nível mais detalhado.

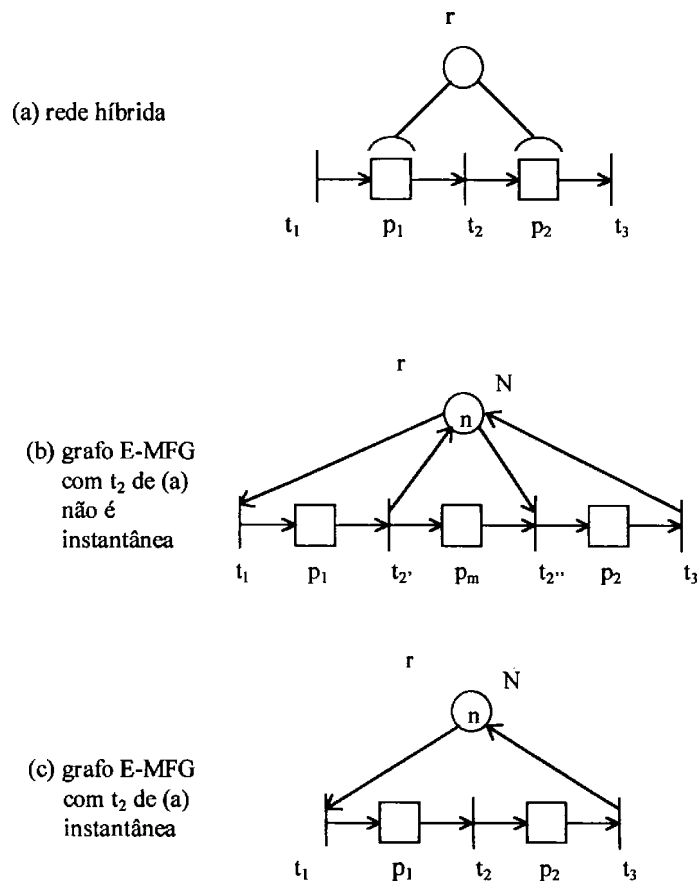


Fig. 2.15 Representação de um recurso em cascata

Em síntese, para obter-se um modelo que represente adequadamente a funcionalidade de um SAP, considerando cada dispositivo presente no mesmo, aplica-se inicialmente o PFS-R para a modelagem conceitual e o E-MFG para o detalhamento funcional segundo um procedimento baseado em quatro etapas fundamentais:

- (1) Representação do SAP a ser modelado por um modelo PFS-R conceitual.

- (2) Representação da alocação de recursos a partir de distribuidores que posteriormente devem ser substituídos por elementos E-MFG.
- (3) Substituição progressivamente dos elementos atividades e dos elementos distribuidores por elementos E-MFG.
- (4) Refinamento sucessivo das atividades, em correspondência com os vários níveis hierárquicos existentes.

Aplicando-se esta metodologia, é possível obter-se um modelo do SAP que representa efetivamente as informações a respeito da estrutura e do comportamento dinâmico do sistema que devem ser verificados durante a realização do controle do mesmo.

## **2.8 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES**

Neste Capítulo apresentou-se o conceito de sistemas antropocêntricos e sua relação com os SAP de elevada autonomia e flexibilidade, estabelecendo as principais características do comportamento dinâmico apresentado por estes sistemas e definindo um conjunto de características essenciais que devem fazer parte do elenco de propriedades de uma ferramenta capaz de tratar estes sistemas.

Prosseguindo, para se especificar e modelar efetivamente a estrutura e o comportamento dinâmico destes sistemas apresentou-se o MFG e suas propriedades para descrever as condições e a ocorrência de eventos. A seguir, apresentou-se o E-MFG como uma extensão do MFG em que se considera marcas individuais no grafo e uma hierarquia no

processo de disparo das transições, incrementando-se assim o poder de modelagem do grafo.

No sentido de sistematizar e racionalizar a tarefa de construção dos grafos MFG e E-MFG apresentou-se o PFS como ferramenta adequada para aplicar uma abordagem ‘top-down’ para a modelagem de sistemas complexos. Em seguida apresentou-se PFS-R como alternativa para representar explicitamente no PFS as etapas dos processos e a alocação dos respectivos recursos.

É importante esclarecer que este Capítulo limitou-se a modelar a funcionalidade do sistema em relação ao objeto de controle, sem haver uma preocupação maior em especificar-se estratégias de controle relacionadas com a evolução dinâmica global desejada para o sistema quando se considera a necessidade de executar um conjunto de processos (ver Fig. 1.5). Portanto, neste Capítulo, os modelos PFS-R/E-MFG descrevem a funcionalidade de cada elemento do sistema, isto é, o que cada parte é capaz de realizar.

Uma vez definida a funcionalidade do objeto de controle, o próximo passo consiste em definir-se o que se deseja realizar, isto é, especificar as estratégias de controle visando a execução de determinados processos. No Capítulo 3 aborda-se o estudo da parte de controle de um SAP, mostrando como se modela a realização de processos produtivos no sistema.

No Anexo A é apresentado uma aplicação da metodologia PFS-R/E-MFG para um estudo de caso que ilustra o potencial desta ferramenta no sentido de modelar sistemas dirigidos por eventos, independente do fato de pertencer a ambientes de manufatura ou

não. Trata-se da especificação do sistema de controle de um sistema de posicionamento da rampa de acesso de veículos a navios.



## CAPÍTULO 3

# CONTROLE DE PROCESSOS EM SAPs (SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS DE PRODUÇÃO)

Uma vez que os recursos utilizados para a operação de SAPs são limitados, para otimizar o desempenho do sistema faz-se necessário adotar técnicas de compartilhamento destes recursos.

Considerando-se o fato de que os SAPs apresentam em seu comportamento dinâmico propriedades de assincronismo e paralelismo de processos, é inevitável o surgimento de competições para utilização de recursos compartilhados, exigindo o desenvolvimento de técnicas adequadas para tratar problemas desta natureza.

Portanto, investigar-se métodos de controle do fluxo de materiais em um SAP é uma necessidade básica e que implica em abordar-se a questão de alocação adequada dos recursos para execução das várias e diferentes etapas produtivas que constituem cada um dos processos do sistema produtivo, permitindo um compartilhamento destas entidades para melhorar o desempenho do sistema.

Neste contexto, este Capítulo apresenta inicialmente um levantamento bibliográfico a respeito da evolução das arquiteturas de controle em sistemas produtivos. A seguir,

discute-se as formas de representar o controle de SAPs em E-MFG, incluindo a representa-se as funções de controle elementares e dos vários tipos de intertravamentos.

Para sistematizar o processo de modelagem do controle de SAPs em E-MFG, apresenta-se um procedimento para representar formalmente a seqüência de produção inerente a cada produto a ser processado e os recursos alocados durante as várias etapas de cada processo.

Finalizando este Capítulo, apresenta-se como a técnica PFS-R/E-MFG é utilizada para o projeto de sistemas de controle de SAPs genéricos.

### **3.1 EVOLUÇÃO DAS ARQUITETURAS DE CONTROLE**

A abrangência do conceito de automação e flexibilidade é bem maior que o controle seqüencial de um processo produtivo. Existe a necessidade de coordenar as atividades produtivas a nível de chão de fábrica envolvendo em uma primeira instância o controle dos recursos disponíveis para executarem estas atividades e em segunda instância o controle da movimentação dos itens processados em cada uma das unidades produtivas deste sistema. Considerando-se estas características, o comportamento do sistema produtivo está intrinsecamente relacionado aos seguintes aspectos:

- A arquitetura do sistema de controle.
- A classificação das funções de controle.
- A especificação dos algoritmos de controle em diferentes níveis estratégicos.

O avanço tecnológico acelerado nas áreas de informática e comunicações tem viabilizado uma série de possibilidades em desenvolvimento de arquiteturas de controle. De acordo com DILTS et al. [1991] e GONG; HSIEH [1997] há, genericamente, quatro propostas básicas de arquiteturas de controle:

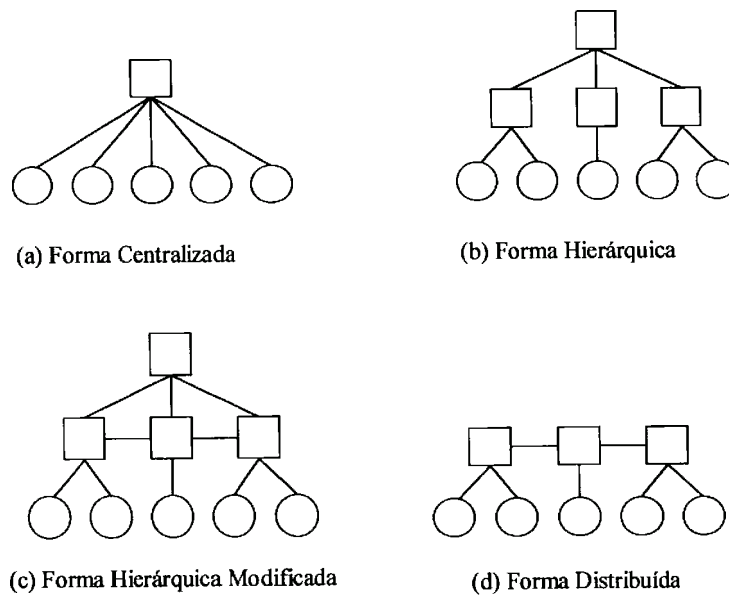
- Centralizada.
- Hierárquica.
- Hierárquica Modificada.
- Distribuída.

A Fig.3.1 representa um esboço destas quatro arquiteturas básicas.

A arquitetura de controle centralizada implica na existência de um computador ou controlador central para gerenciar e manter todas as funções de planejamento e informações de evolução dos processos produtivos no sistema. Desta forma, existe um conjunto de máquinas que executam os comandos ordenados a partir do controlador central que, por sua vez, é realimentado com informações relativas aos resultados dos processos executados.

Em uma arquitetura de controle estritamente hierárquica, há uma divisão do controle em vários níveis de abstração de maneira que existe uma distribuição seletiva do controle nestes vários níveis. A “comunicação horizontal” (representada por linhas horizontais que unem os dispositivos de controle da Fig. 3.1) entre controladores de um mesmo nível não existe. Esta arquitetura baseia-se portanto em uma hierarquia de controladores em que o superior comunica-se apenas com os imediatamente subordinados e não os

subordinados de seus subordinados. Esta concepção agrega um certo nível de autoridade a cada controlador, de acordo com a sua posição na escala de níveis de abstração de controle adotada.



**Obs.** Os elementos □ representam dispositivos de controle.

Fig. 3.1 Formas básicas de arquiteturas de controle de sistemas produtivos

A arquitetura de controle hierárquica modificada é similar à estrutura estritamente hierárquica com a ressalva de que é possível haver comunicação entre os controladores de um mesmo nível. Esta característica rompe a rigidez da estrutura mestre/escravo entre níveis de controle. Enquanto um nível superior é responsável pela inicialização de um determinado processo, os subordinados são capazes de cooperarem para completar as atividades deste processo em seqüência.

Uma arquitetura distribuída, também denominada heterárquica, corresponde ao limite de flexibilidade, em termos de fluxo de informações entre controladores, que pode ser alcançado em uma estrutura hierárquica modificada. As características predominantes destas arquiteturas são: a obtenção de uma plena autonomia local de controle e uma abordagem cooperativa para a tomada de decisões globais.

A Tabela 3.1 descreve as principais características de cada uma das formas de arquitetura de controle discutidas e faz uma comparação entre elas.

### **3.2 REPRESENTAÇÃO DO CONTROLE EM E-MFG**

Uma vez discutida a arquitetura física do sistema de controle, apresenta-se nesta seção uma técnica para representação das funções de controle a serem executadas em cada um destes dispositivos.

De acordo com SANTOS FILHO [1993], em sistemas produtivos há um complexo conjunto de informações qualitativas e quantitativas<sup>1</sup>. A nível de controle interno das máquinas, dispositivos e processos, envolvendo somente variáveis contínuas, realiza-se o controle quantitativo.

---

<sup>1</sup> As informações quantitativas referem-se ao estado de variáveis contínuas que modelam o comportamento dinâmico de SVCs. As informações qualitativas referem-se aos estados discretos que modelam o comportamento dinâmico de SEDs.

Tabela 3.1 Síntese das características, vantagens e desvantagens das formas de controle ilustrada na Fig. 3.1.

Arquitetura	Características	Vantagens	Desvantagens
<b>Centralizada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existe um único computador de grande porte padrão.</li> <li>• Todas decisões de controle são tomadas em uma plataforma única.</li> <li>• Existe uma base de dados global de todas atividades do sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acesso às informações globais.</li> <li>• Possibilidade de uma otimização global.</li> <li>• Aquisição simplificada de informações sobre o estado do sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de resposta relativamente lenta.</li> <li>• Relativa dificuldade para atualizar programa de controle.</li> <li>• Dependência de uma única unidade de controle.</li> </ul>
<b>Hierárquica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existe uma variedade de tipos de computadores.</li> <li>• A relação de mestre/escravo é rígida entre níveis de decisão de controle.</li> <li>• O supervisor coordena todas atividades dos subordinados.</li> <li>• Existe uma base de dados agregada a cada nível de controle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementação gradual e com redundância.</li> <li>• Possibilidade de adição incremental de algoritmos de controle.</li> <li>• Respostas relativamente rápidas no tempo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sofre limitações dos computadores locais.</li> <li>• Existe um incremento do número de 'links' de comunicação entre níveis de controle.</li> <li>• Relativa dificuldade em realizar futuras alterações forçadas.</li> </ul>
<b>Hierárquica Modificada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existe uma variedade de tipos de computadores.</li> <li>• Não existe relação de mestre/escravo entre níveis de controle.</li> <li>• O supervisor inicializa seqüência de atividades em subordinados.</li> <li>• Os subordinados cooperam para completar uma ação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todas as vantagens da forma hierárquica.</li> <li>• Possibilidade dos sistemas locais possuírem autonomia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maioria das desvantagens da forma hierárquica.</li> <li>• Maiores problemas de conectividade.</li> <li>• Dificuldade crescente de desenvolvimento do sistema de controle.</li> </ul>
<b>Heterárquica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existem múltiplos computadores.</li> <li>• Não existe relação de mestre/escravo.</li> <li>• Existe completa autonomia local.</li> <li>• A tomada de decisões é distribuída.</li> <li>• Existem apenas bases de dados locais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Completa autonomia local.</li> <li>• Relativa redução da complexidade do programa de controle.</li> <li>• Existe tolerância a falhas implícita.</li> <li>• Facilidade para executar operações de reconfiguração.</li> <li>• Rápida difusão de informações.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sofre limitação técnica dos controladores.</li> <li>• Relativa dificuldade quanto a estabelecer padrões para comunicação, protocolos ou sistemas operacionais.</li> <li>• Necessita de redes de alta capacidade.</li> </ul>

Em relação às funções de controle de supervisão da produção relacionadas às operações dos processos de chão de fábrica, realiza-se o controle qualitativo para a coordenação do fluxo de materiais e alocação de recursos necessários.

Desta forma, os sistemas produtivos são sistemas híbridos em que convivem as duas naturezas de controle. No presente trabalho, são abordadas técnicas de controle considerando apenas as informações qualitativas, pois estas definem as referências e parâmetro dos controladores de sistemas de variáveis contínuas que estão num nível mais inferior do controle (nível de ações). Desta maneira, define-se:

**Definição 3.1** Realizar o controle de tarefas de um sistema produtivo significa executar as ações de controle a partir de uma seqüência pré-programada ou em resposta à observância de condições previamente estabelecidas.

Genericamente, um modelo que representa um dispositivo de controle e o respectivo objeto de controle a ser controlado pode ser representado pelo diagrama de blocos da Fig. 3.2.

O E-MFG apresentado no Capítulo 2 é adequado para modelar a funcionalidade do objeto de controle, e, em SANTOS FILHO; MIYAGI [1994], SANTOS FILHO; MIYAGI [1995a], SANTOS FILHO; MIYAGI [1995b], MIYAGI et al. [1995], MIYAGI et al. [1996], SANTOS FILHO et al. [1996], SANTOS FILHO [1997] são apresentados diferentes casos onde se comprova a eficiência do E-MFG em modelar sistemas de controle.

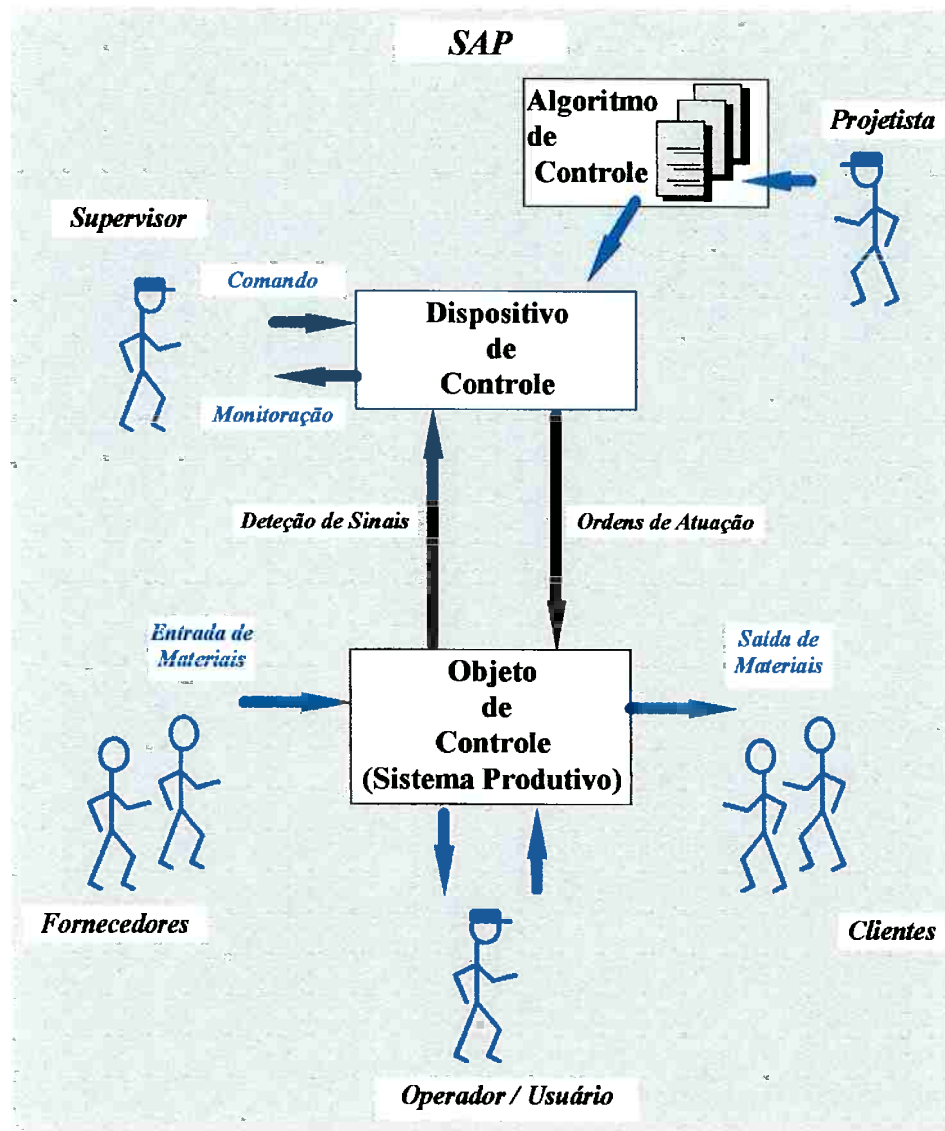


Fig. 3.2 Representação do dispositivo de controle e objeto de controle de um SAP

O comportamento dinâmico de um sistema produtivo modelado em E-MFG é representado através da evolução das marcas neste modelo. Neste contexto, cada marcação do grafo corresponde a um estado do sistema.

Por sua vez, o sistema de controle modelado em E-MFG evolui de estado para estado em função das correspondentes evoluções das marcas no grafo. A sincronização entre a



evolução dinâmica dos dois grafos (do sistema produtivo e do sistema de controle) resulta no efetivo controle do sistema produtivo. Esta sincronização consiste na especificação de um fluxo de informações “vertical” (entre dois grafos) modelado a partir dos seguintes elementos E-MFG:

- Arcos de sinais de saída. Envia informações do dispositivo de controle para atuar no objeto de controle.
- Portas externas. Recebem os sinais detectados no objeto de controle, realimentando o dispositivo de controle.

A Fig. 3.3 ilustra um exemplo em que se verifica o fluxo de informações entre os modelos do sistema e seu controle.

Em MIYAGI [1996] é apresentada uma forma de tratamento do controle de sistemas dirigidos por eventos considerando-se níveis de abstração adequados para que os conceitos apresentados possam ser interpretados como postulados do controle de sistemas desta natureza. Neste sentido, as funções de controle sintetizam-se em:

A) Especificação de intertravamentos.

Partindo do pressuposto de que um intertravamento corresponde à especificação de condições restritivas, que não permite qualquer tipo de alteração de ação ou estado até que estados ou ações anteriores sejam completadas, há uma série de tipos de intertravamentos que podem ser modelados em E-MFG para controlar sistemas produtivos. A Tabela 3.2 descreve os vários tipos e a Fig. 3.4 ilustra um exemplo de modelagem destes intertravamentos em um grafo E-MFG.

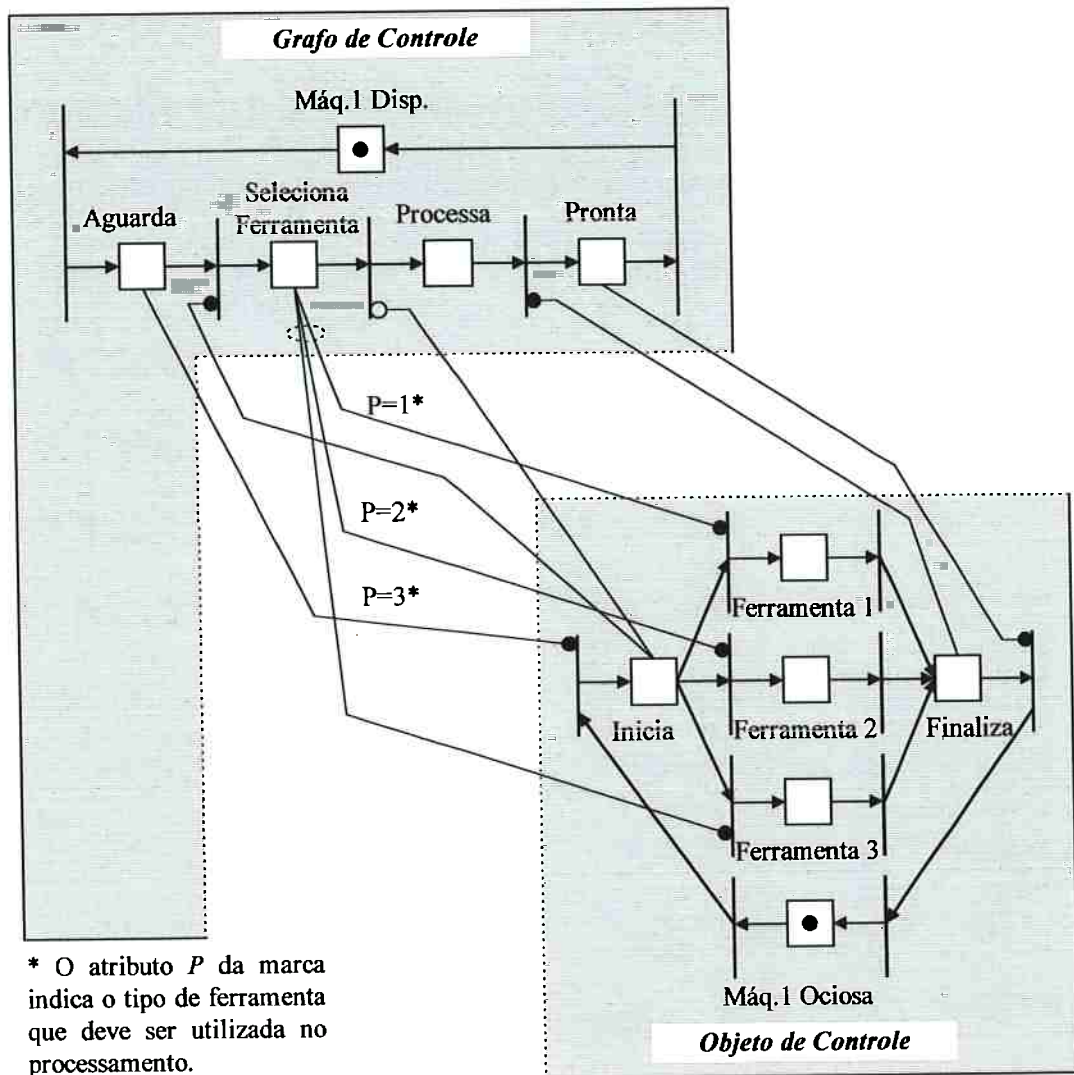


Fig. 3.3 Exemplo de Modelo E-MFG conectando o controle e o objeto de controle

Tabela 3.2 Os vários tipos de intertravamentos

Intertravamento	Estratégia de controle
De partida	São condições que devem se verificadas no instante de partida e não são consideradas durante o funcionamento.
De funcionamento	São condições que devem ser consideradas continuamente durante a evolução da dinâmica do sistema.
Temporizado	Determina-se um intervalo de tempo entre o funcionamento de cada equipamento ou das etapas de funcionamento de um mesmo equipamento.
De não simultaneidade	Força o fato de a ocorrência ser mutuamente exclusiva para determinados eventos.
De seqüência de acionamento	Estabelece as condições de habilitação ou inibição de equipamentos integrados em série.
Do processo	Estabelece as condições de habilitação ou inibição de transição de estados. Este tópico será visto em detalhes na seção 3.3.

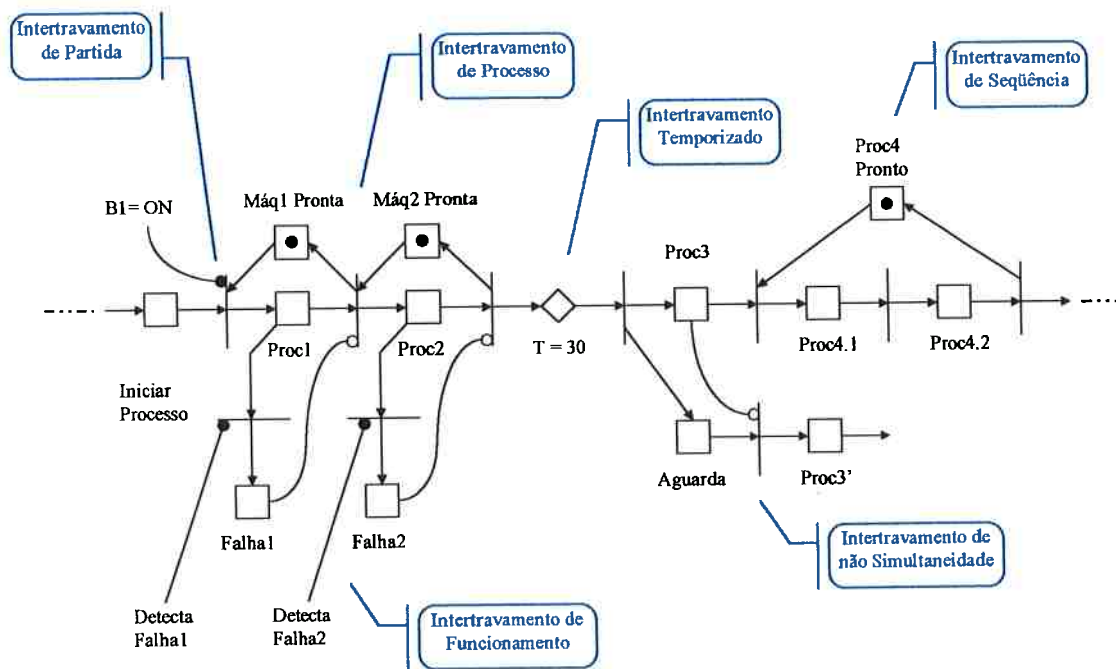
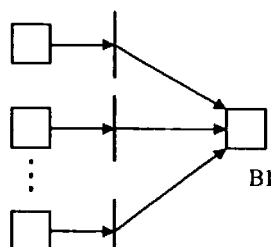
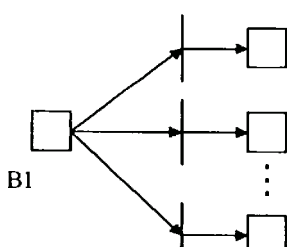


Fig 3.4 Representação de intertravamentos em um grafo E-MFG

**B) Arbitração de conflitos.**

Faz-se necessária em situações onde ocorre convergência de fluxo de itens (origina um box de conflito de entrada) ou divergência de fluxo de itens (origina um box de conflito de saída) de e para eventos mutuamente exclusivos. A Tabela 3.3 apresenta os tipos básicos de conflito, como arbitrá-los e como modelar em E-MFG.

Tabela 3.3 Os tipos de conflitos e sua arbitragem

Tipos de Conflitos		
 <p>(a) Conflito de Entrada em B1</p>		 <p>(b) Conflito de Saída em B1</p>
Tipos de Arbitragem		
Especificação de uma sequência fixa para disparar as transições em conflito.	Especificação de regras de controle para determinação de uma sequência de disparo das transições em conflito em função do estado global do sistema.	Arbitragem hierárquica que permite a especificação de meta-regras para a determinação de regras para a solução do conflito.
Arbitragem em E-MFG		
Através de sub-grafos E-MFG que representam as regras de arbitragem.	Através de árbitros externos que se comunicam com o sistema de controle por meio de arcos de sinal de saída (para detectar o estado do sistema) e portas externas (para executar a arbitragem).	

### C) Manutenção e detecção de estados.

Os estados são interpretados como sendo as condições em que o sistema se encontra entre as ocorrências de eventos. A ocorrência de um evento provoca uma transição de estados que pode ser mantido independente do tempo e de uma nova ocorrência do mesmo evento, sendo possível correlacionar uma nova transição de estado à necessidade da ocorrência de um outro evento desejado. A Fig. 3.5 ilustra um exemplo desta natureza.

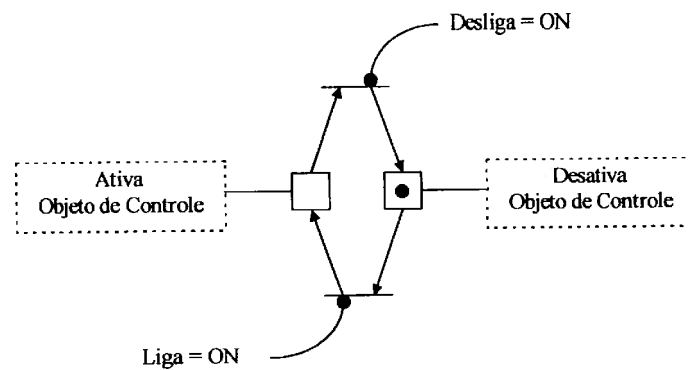


Fig. 3.5 Exemplo de modelo E-MFG com retenção de estado

### D) Processamento temporizado.

Todas as vezes que for conveniente realizar controle de malha aberta, é possível utilizar elementos temporizadores de acionamento com atraso e retorno instantâneo ('on-delay') ou ainda temporizadores com acionamento instantâneo e retorno com atraso ('off-delay'). A implementação destas

funções de controle em E-MFG obtêm-se diretamente utilizando-se os elementos box temporizado ou transição temporizada.

Considerando-se, genericamente, a complexidade que um sistema produtivo pode apresentar em seu comportamento dinâmico, o conhecimento das funções de controle elementares é fundamental mas não é suficiente para orientar o processo de desenvolvimento do sistema de controle do sistema global. Neste sentido, estuda-se a seguir procedimentos específicos que permitem sistematizar a tarefa de especificação do controle de processos e alocação de recursos em E-MFG.

### **3.3 MODELAGEM E CONTROLE DE PROCESSOS**

De acordo com BANASZAK [1991] o roteamento correspondente ao fluxo de operações de produtos em um sistema produtivo pode ser classificado de acordo com a complexidade funcional do próprio sistema. Nestes termos têm-se:

- Processo Simples. Corresponde a uma seqüência de operações ordenada linearmente.
- Processo Complexo. Corresponde a uma seqüência de operações parcialmente ordenada.
- Processo Redundante. Corresponde a situação em que um conjunto de operações de um determinado processo pode ser realizado a partir da utilização de recursos alternativos disponíveis no sistema.

- Processo Concorrente. Corresponde a situação de um 'job shop' em que um mix de produtos pode ser produzido simultaneamente segundo diversas rotas.

O objetivo básico consiste em definir-se uma sistemática para a modelagem destes processos. Se os processos forem modelados a partir de uma seqüência de operações e uma seqüência de recursos utilizados para realizar cada uma das operações correspondentes, é possível estruturar-se um grafo E-MFG para modelar cada um destes processos.

Inicialmente, define-se  $Q$  como sendo o conjunto de  $n$  produtos diferentes a serem processados em um sistema produtivo, de acordo com a expressão 3.1.

$$Q = \{q \in n \mid q \leq n\} \quad (3.1)$$

Onde:

$q$  identifica o produto

$n$  é o conjunto dos números naturais

Formalmente, existe uma seqüência de operações associada a cada produto  $q$  a qual, por sua vez, agrega uma seqüência de recursos necessários. Neste contexto, é possível dividir a seqüência de operações em etapas, de maneira que a cada uma destas etapas aloca-se um recurso específico. Como resultado, obtém-se uma seqüência de produção  $p_q$  do produto  $q$ , de acordo com a expressão 3.2.

$$p_q = \{s_q(0), s_q(1), \dots, s_q(L_q), s_q(L_q + 1)\} \quad (3.2)$$

Onde:

$L_q$  representa o comprimento da seqüência de produção do produto  $q$

$s_q(i)$  representa a  $i$ -ésima etapa da seqüência de produção do produto  $q$

$s_q(0)$  representa a condição inicial para iniciar a seqüência de produção do produto  $q$

$s_q(L_q + 1)$  representa a condição correspondente ao estado em que a seqüência de produção do produto  $q$  está concluída

Desta forma pode-se definir a seqüência de recursos  $r_q^*$  correspondente à seqüência de produção  $p_q$  do produto  $q$ , de acordo com a expressão 3.3.

$$r_q^* = \{r_q(1), r_q(2), \dots, r_q(L_k)\} \quad (3.3)$$

Onde:

$r_q(j)$  representa o recurso utilizado na etapa  $s_q(i)$ <sup>2</sup> da seqüência de produção do produto  $q$

Utilizando-se as informações contidas nas expressões 3.1 e 3.2 é possível modelar-se estas seqüências de produção e de recursos a partir de modelos E-MFG. O procedimento para gerar-se estes modelos é o seguinte:

- A) Cada recurso  $r_q(j)$  é modelado por um box capacidade  $Cr_q(j)$  para permitir a representação do número de unidades deste recurso disponíveis no sistema.

<sup>2</sup> Se os recursos alocados para a realização de uma determinada seqüência de produção de um produto são utilizados uma única vez para o processo em questão então  $i=j$  e, na expressão 3.3  $L_k = L_q$ .



- B) Cada etapa  $s_q(i)$  da seqüência de produção é modelada por um box  $Ps_q(i)$  do tipo simples, estando de acordo com o princípio de que cada recurso só é associado a um processo de cada vez, sendo impossível simultaneidade de processos alocados para um único recurso.
- C) Para cada produto  $q \in Q$  associa-se uma seqüência de transições de acordo com a expressão 3.4, cujos arcos de entrada são de  $Ps_q(j)$  para  $t_q(j+1)$  e os arcos de saída são de  $t_q(j)$  para  $Ps_q(j)$  onde  $j$  varia de acordo com a expressão 3.5.

$$t_q \in \{t_q(0), t_q(1), \dots, t_q(L_q + 1)\} \quad (3.4)$$

$$j \in \{0, 1, 2, \dots, (L_q + 1)\} \quad (3.5)$$

- D) Em relação às seqüências de produção, a marcação inicial é tal que não considera nenhuma etapa de processo em andamento no estado inicial, correspondendo a uma situação em que o sistema encontra-se completamente ocioso. Portanto, a marcação inicial  $M_0$  dos elementos do tipo box que modelam as etapas do processo é dada pela expressão 3.6.

$$M_0(Ps_q(j)) = 0 \quad (3.6)$$

Onde:

$$j \in \{1, 2, \dots, (L_q + 1)\}$$

- E) A marcação inicial dos elementos que modelam os recursos representa o número de unidades disponíveis de cada um destes recursos  $r_q(j)$  do sistema.

A Fig. 3.6 ilustra um modelo E-MFG genérico correspondente à seqüência de produção de um produto  $q$  e a correspondente seqüência de recursos, obtido a partir do procedimento descrito acima. Neste modelo, os elementos do tipo box simples representam as etapas do processo, havendo apenas a ressalva de modelar-se  $Ps_q(0)$  e  $Ps_q(L_q+1)$  através do elemento box capacidade para representar efetivamente a demanda por este processo, possibilitando o armazenamento temporário de produtos aguardando o processamento e de produtos prontos, respectivamente.

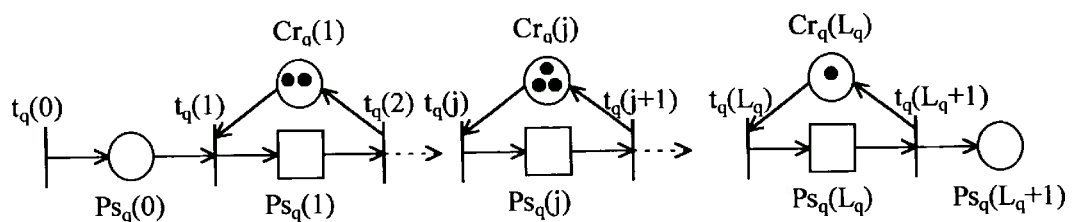


Fig. 3.6 Modelo de uma seqüência de produção correspondente ao produto  $q$

A dinâmica deste processo pode ser interpretada a partir do disparo da transição  $t_q(0)$  correspondendo à ocorrência do evento que indica a existência de um produto pronto e que habilita o início do processo. Quando o processo avança da etapa  $s_q(j-1)$  para a etapa  $s_q(j)$  por causa do disparo de  $t_q(j)$  (uma marca flui de  $Ps_q(j-1)$  para  $Ps_q(j)$ ), uma unidade do recurso  $r_q(j-1)$  é liberada e uma unidade do recurso  $r_q(j)$  é alocada para executar a etapa  $s_q(j)$  do processo (uma marca é adicionada em  $Cr_q(j-1)$  e uma marca é retirada de  $Cr_q(j)$ ). Este intertravamento caracteriza-se por não liberar um novo processamento na etapa atual do processo até que os recursos necessários para a execução da próxima

etapa estejam disponíveis. Este procedimento gera uma rede livre de contato adequada para a realização do controle (MIYAGI [1996]).

### **3.4 PFS-R/E-MFG NA ESPECIFICAÇÃO DO CONTROLE**

O modelo necessário para o efetivo controle dos processos executados em um sistema produtivo envolve o detalhamento de cada uma das etapas das seqüências de produção até que seja possível estabelecer uma comunicação explícita e bem definida entre este modelo e o objeto de controle, conforme exemplificado anteriormente na Fig. 3.3. Este detalhamento significa desenvolver um modelo adequado para representar consistentemente as condições e os eventos que determinam o comportamento dinâmico desejado para o sistema.

É importante observar que este detalhamento não significa necessariamente descrever os eventos a nível de controle local das máquinas, a menos que a arquitetura de controle que esteja sendo desenvolvida seja do tipo centralizada.

Se o contexto é de uma arquitetura hierárquica distribuída, o modelo do sistema de controle em cada nível hierárquico deve ser detalhado o suficiente para representar o nível de abstração das condições e eventos que provocam uma transição de estado no respectivo nível. O fluxo de informações de controle entre níveis diferentes de abstração deve ser modelado através de arcos de sinal de saída e portas internas, conforme ilustra a Fig. 3.7.

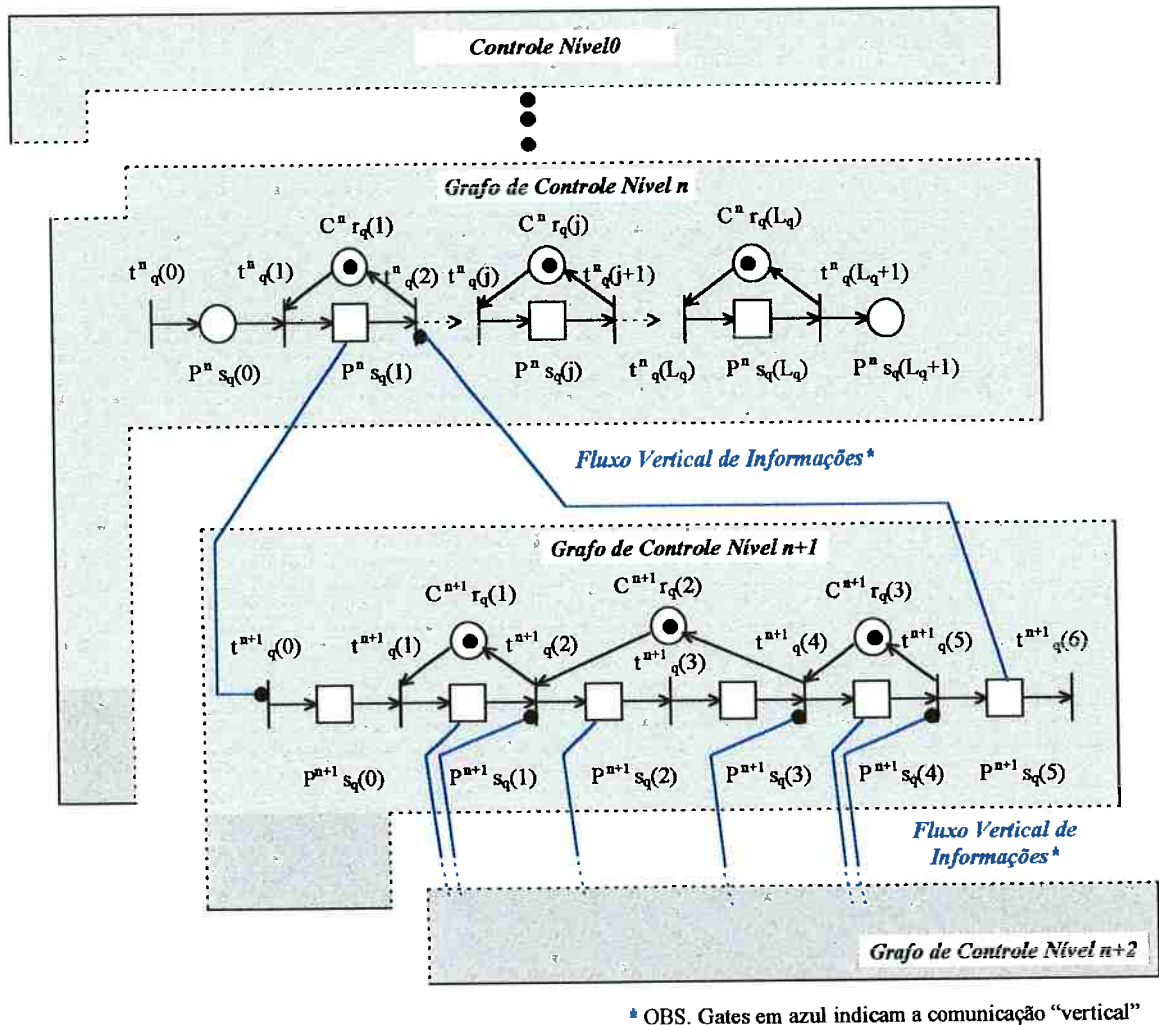


Fig. 3.7 Comunicação entre níveis de controle em uma arquitetura hierárquica distribuída

Um aspecto importante que deve ser considerado em relação ao desenvolvimento do sistema de controle em vários níveis é que o fluxo de informações de controle "vertical" entre níveis diferentes deve ser modelado a partir de portas (internas e/ou externas) e arcos de sinal de saída para que não haja problemas de 'deadlock' causados por intrusão ou vazamento de marcas em atividades (MIYAGI [1988]).

Quanto ao aspecto de sistematizar e racionalizar a tarefa de desenvolvimento de todos os processos contidos em um determinado sistema produtivo a nível global, faz-se necessário explorar a metodologia PFS-R/E-MFG.

Conforme citado no Capítulo 2, o PFS-R/E-MFG é uma metodologia que envolve a aplicação do conceito de hierarquia no sentido de modelar a funcionalidade de um sistema através de refinamentos sucessivos a partir de um modelo conceitual. Trata-se de uma técnica de representação gráfica onde, a nível conceitual, são identificados através do PFS-R, os elementos ativos e passivos do sistema, suas inter-relações e a alocação dos recursos disponíveis. Ainda que o procedimento para desenvolvimento do modelo seja hierárquico, nada impede que esta metodologia seja aplicada no desenvolvimento de arquiteturas de controle heterárquicas, pois a abordagem em vários níveis de abstração é apenas um recurso para tratar a complexidade dos sistemas a serem modelados.

Considerando-se estas características, os componentes ativos são considerados sub-sistemas de maneira que a partir de refinamentos consecutivos geram uma descrição E-MFG capaz de detalhar o comportamento dinâmico dos sistemas. O procedimento de “tradução” do modelo inicial PFS-R em E-MFG é análogo ao apresentado no Capítulo 2 onde se aplica a metodologia para a modelagem do sistema considerando-se apenas o objeto de controle.

A Fig. 3.8 ilustra um exemplo de aplicação do PFS-R para modelar uma seqüência de quatro etapas de um processo genérico em que há compartilhamento de recursos obtendo-se um modelo híbrido PFS-R/E-MFG.

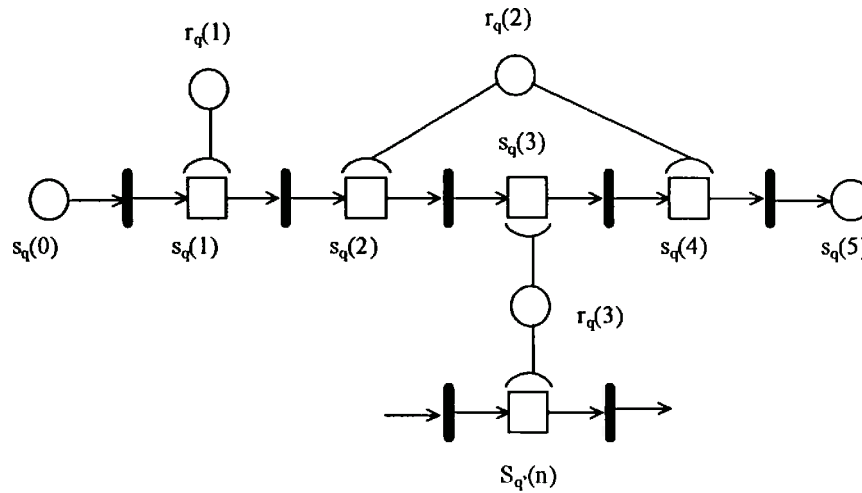


Fig.3.8 Modelo PFS-R de um processo com alocação e compartilhamento de recursos

Antes de finalizar esta seção, resta analisar o problema de utilizar-se macros do E-MFG do tipo elemento agrupador, ou dispensador para modelar tarefas de início simultâneos ou fim simultâneos, respectivamente. Para que o grafo de controle gerado seja livre de contato é necessário adicionar-se um compensador além da representação do recurso alocado, para realizar a tarefa em questão. A Fig. 3.9 ilustra o compensador adicional que é considerado a partir da construção do complemento da respectiva situação de contato, de acordo com MIYAGI [1996]. Situações típicas deste tipo de ocorrência são as operações de carga e descarga de  $n$  elementos em um ‘pallet’.

Desta forma, o PFS-R/E-MFG demonstra ser uma ferramenta adequada para modelar os processos realizados em um sistema produtivo e a alocação e compartilhamento dos recursos disponíveis para executarem estes processos, permitindo um controle efetivo do fluxo de operações no sistema.

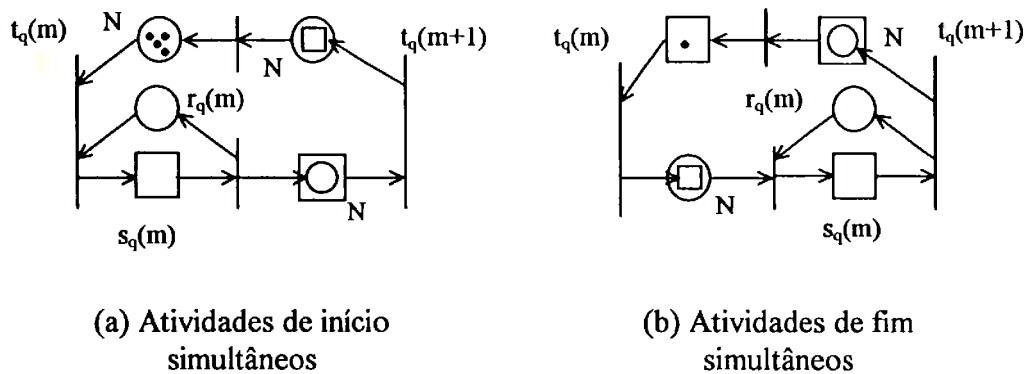


Fig.3.9 Adição de compensadores para as macros do E-MFG

### 3.5 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES

Neste Capítulo apresentou-se inicialmente um estudo comparativo das várias arquiteturas básicas existentes para o controle de sistemas produtivos, estabelecendo-se um paralelo em termos das características fundamentais de cada forma de controle: centralizada, hierárquica, hierárquica modificada e distribuída.

No sentido de projetar-se sistemas de controle de SAPs, apresentou-se o E-MFG como ferramenta básica para a modelagem da parte de controle destes sistemas, detalhando-se a modelagem das funções elementares de controle de tarefas e os intertravamentos fundamentais.

Para orientar o procedimento de especificação do controle em E-MFG dos vários processos executados em um sistema de produção, apresentou-se uma descrição formal dos processos, definindo-se a seqüência de produção para cada produto em que a execução de cada etapa restringe-se a alocar um único recurso.

Finalizando, para explorar a capacidade de modelagem do E-MFG foi introduzida a metodologia PFS-R/E-MFG para a modelagem dos elementos atividade, distribuidor e alocação de recursos. Sendo assim, foram abordados aspectos fundamentais pertinentes à distribuição do controle em vários níveis, ao fluxo “vertical” de informações de controle e ao tratamento de macros para estabelecer um grafo livre de contato e que atenda às especificações funcionais do SAP.

É importante observar que o E-MFG não é conservativo em relação às marcas que representam o fluxo de materiais no sistema, pois podem ter seus atributos atualizados por elementos do tipo box controlador, que devem ser utilizados justamente para indicar a ocorrência de uma alteração no estado do item que é processado. Entretanto, em relação às marcas que identificam os recursos disponíveis, seus atributos são mantidos através de filtragens seletivas, justamente para que ao final de cada etapa de um processo o recurso seja disponibilizado de acordo com o estado em que se encontrava antes de ser utilizado.

Desta forma, pode-se afirmar que o grafo é conservativo no sentido de modelar os recursos disponíveis em um sistema de produção, considerando a evolução dinâmica do mesmo e a capacidade de atualizar os atributos das marcas individuais do E-MFG através do elemento do tipo box controlador que realiza alterações condicionadas e/ou através dos processos de filtragens seletivas efetivados a partir de inscrições descritas nos arcos orientados.

Uma vez que pode existir um compartilhamento de recursos para a realização dos processos, é necessário controlar-se efetivamente a evolução do conjunto de processos que ocorre no SAP para que não haja problemas de travamento no sistema devido a um



fluxo inadequado de materiais a serem processados, já que é este fluxo quem realmente integra as diversas estações de trabalho. Este é o assunto a ser abordado no Capítulo 4.

# **CAPÍTULO 4**

## **‘DEADLOCK’ NO FLUXO DE ITENS DE SAPS**

Os SAPs caracterizam-se pela variedade de ordens de comando para a realização de processos no ambiente industrial, resultando em uma constante arbitragem de conflitos e alteração de suas condições e de sua dinâmica.

Desta forma, o controle da evolução dinâmica dos processos em um sistema produtivo deve realizar, quando necessário, a arbitragem dos conflitos que ocorrem em situações em que existe uma disputa para utilização de um determinado recurso por processos concorrentes<sup>1</sup> em um determinado instante e procurando com isto otimizar a taxa de utilização dos recursos existentes, mantendo-se o sistema operando de forma eficiente.

Esta abordagem evoca a necessidade de aplicar-se métodos apropriados para modelar e implementar procedimentos de gerenciamento dinâmico da alocação de recursos. A eficiência destes métodos está diretamente relacionada ao desempenho dos algoritmos de controle utilizados nestes sistemas que devem suportar indeterminismos em relação a qual processo será executado em um determinado instante e quando um dado recurso será utilizado por um determinado processo.

A ocorrência de auto-travamento ou 'deadlock' no fluxo de materiais ou informações é uma situação caracterizada pela interrupção da movimentação de todos ou parte dos produtos processados no sistema.

Eliminando-se a hipótese de falhas que comprometem a funcionalidade dos equipamentos, a causa deste distúrbio relaciona-se ao fato dos fluxos de itens (materiais e informações) existentes alocarem de tal maneira os recursos necessários que provocam, por exemplo, a formação de circuitos fechados de movimentação deste itens (materiais e informações). Portanto, o 'deadlock' constitui-se em um problema crítico de programação e controle de um SAP.

Este problema tem sido ignorado pela maioria das abordagens de programação e controle da produção que comumente assumem modelos de filas com capacidade infinita (CHO et al. [1995]) desconsiderando ainda qualquer tipo de interação com o homem. Entretanto, esta hipótese não é verdadeira para as aplicações de SAPs.

Neste Capítulo, apresenta-se inicialmente um levantamento do problema de gerenciamento do fluxo de itens em sistemas produtivos considerando as várias abordagens pertinentes a este assunto.

A seguir, define-se criteriosamente a situação de 'deadlock' do fluxo de itens, para analisar-se o problema de transporte de materiais entre estações de trabalho. Para a solução deste problema são utilizados grafos do tipo requisição/alocação (HASEGAWA et al. [1996a], HASEGAWA [1996], HASEGAWA et al. [1996b], HASEGAWA et al. [1996c], CHO et al. [1995]). Estes grafos são representados adequadamente na forma

---

<sup>1</sup> O conceito de processos concorrentes relaciona-se a um conjunto de processos executados em paralelo  $\{P_i \mid i = 1, \dots, r\}$ , sendo que cada processo  $P_i$  é definido a partir de uma seqüência de etapas de processo

matricial e aplicando-se teoremas fundamentais da teoria de grafos, obtém-se um procedimento para o projeto de elementos compensadores para evitar-se situações de 'deadlock' desta natureza.

Finalizando, é proposto um procedimento que estabelece um conjunto mínimo de compensadores para serem adicionados no controle do sistema que asseguram a não ocorrência de 'deadlock'.

#### 4.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE 'DEADLOCK'

A Fig. 4.1 ilustra uma situação típica: o sistema produtivo encontra-se no estado em que as máquinas Máq.1, Máq.2 e Máq.3 contêm os produtos P1, P2 e P3, respectivamente processados, aguardando transporte, sendo que a seqüência de processamento destes produtos é a seguinte:

- Produto P1: *Máq.1* → *Máq.3*.
- Produto P2: *Máq.2* → *Máq.1*.
- Produto P3: *Máq.3* → *Máq.2*.

Observa-se uma situação em que, se a capacidade de carga do robô e das máquinas for unitária, cada produto permanece aguardando o transporte para uma determinada máquina que se encontra ocupada por outro produto. Este circuito de espera causa 'deadlock' no fluxo de materiais.

Para o sistema prosseguir as operações produtivas é necessário uma intervenção humana ou a instalação de 'buffers' para armazenamento temporário dos produtos. Entretanto, a situação de 'deadlock' pode repetir-se novamente quando os 'buffers' forem totalmente preenchidos.

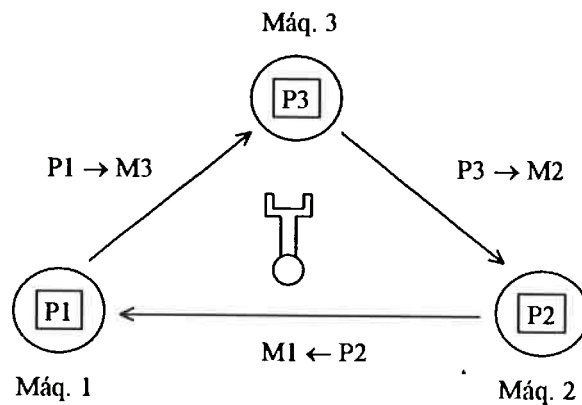


Fig. 4.1 Exemplo de alocação cíclica de recursos

O problema de travamento do sistema causado pela interrupção do fluxo de materiais pode ocorrer em sistemas produtivos desde que haja pelo menos duas máquinas disponíveis para realizar os processos.

De acordo com CHO et. al. [1995], para o caso genérico de um sistema produtivo contendo  $n$  máquinas, o número total de situações de 'deadlock'  $N_D$  possíveis é dado pela expressão 4.1.

$$N_D = \sum_{i=2}^n \binom{n}{i} \quad (4.1)$$

O problema de 'deadlock' já foi exaustivamente estudado em computação no contexto de sistemas operacionais (COFFMAN et al. [1971], PETERSON; SILBERSCHATZ [1985]). Entretanto, os algoritmos de controle desenvolvidos para sistemas operacionais computacionais não são eficientes para aplicações em SAPs porque não incorporam as informações operacionais que indicam a ordem específica segundo a qual os recursos devem ser alocados e liberados para executar as operações no sistema (BANASZAK; KROGH [1990]).

É conhecido o fato de que são quatro as condições necessárias para a ocorrência de 'deadlock' em sistemas onde há processos concorrentes (BANASZAK; KROGH [1990]):

- Mútua exclusão. Cada processo requisita o uso exclusivo de um recurso.
- Retenção enquanto espera. Enquanto aguarda a liberação de recursos de outros processos, um determinado processo não libera os recursos alocados por ele.
- Não há preempção. Um recurso só pode ser liberado pelo processo que o alocou primeiro.
- Espera circular. Existe uma cadeia cíclica fechada de processos aguardando a liberação dos recursos alocados por outros processos.

Para evitar o 'deadlock' em um sistema é suficiente garantir-se que pelo menos uma das condições acima nunca irá ocorrer.

Em CHO et al. [1995] o problema de 'deadlock' é abordado considerando-se que o sistema já está travado e um conjunto de ações são realizadas no sentido de detectar este estado e resolver o problema. Este tipo de solução apresenta o inconveniente de possibilitar a ocorrência de situações em que o tempo de recuperação do sistema após detecção de 'dedlocks' é relativamente longo, comprometendo o desempenho global do sistema.

Outra abordagem baseia-se em garantir que o sistema seja concebido de modo que intrinsecamente fique livre de 'deadlock'. Em VISWANADHAM et al. [1990] a estratégia adotada consiste em primeiro realizar um estudo para a prevenção do 'deadlock' através de uma análise da árvore de alcançabilidade do sistema e para evitar a ocorrência de 'deadlock' é proposto um controlador baseado em redes de Petri em tempo real. Mantendo o mesmo enfoque, EZPELETA et al. [1995] realiza um estudo exaustivo das propriedades estruturais de uma classe especial de redes derivadas de redes de Petri para prevenir o 'deadlock' e, para evitá-lo, propõe uma estratégia de acrescentar-se novos elementos à rede para restringir a ocorrência do travamento. Entretanto, este tipo de abordagem mostra-se limitada quando se considera a tendência crescente de complexidade dos SAPs com constantes alterações em sua dinâmica (reprogramação da produção e produtos) que torna computacionalmente inviável a aplicação de métodos que resolvem estruturalmente o problema de prevenção de 'deadlocks'.

Assim, apresenta-se a seguir os resultados do presente trabalho no sentido de adotar-se uma solução para o problema que agregue características de robustez e eficiência no SAP. Baseado nesta premissa, enfoca-se uma solução no sentido de *evitar-se* as

ocorrências de 'deadlock', adotando estratégias de controle em tempo real que reagem mediante situações em que é necessário tomar-se decisões sobre a alocação de recursos. BANASZAK; KROGH [1990], XING et al. [1995], REVELIOTIS; FERREIRA [1996], HASEGAWA [1996], HASEGAWA et al. [1996a], HASEGAWA et al. [1996c] e XING et al. [1996] são exemplos de técnicas baseadas nesta abordagem e que foram consideradas no desenvolvimento da presente proposta.

Portanto, a solução adotada para o problema baseia-se em um algoritmo que evita 'deadlocks' a partir de informações geradas por um procedimento de busca em grafos de alocação de recursos que age diretamente no sistema de controle sincronizando e arbitrando eventos que determinam o compartilhamento de recursos durante a evolução dinâmica do sistema.

Desta forma, obtém-se um controle efetivo através de um fluxo de informações locais que permite uma cooperação entre os recursos para atingir-se os objetivos do sistema.

Em relação ao comportamento dinâmico dos SAPs enfocados são consideradas as seguintes hipóteses:

- O número de unidades de cada recurso é constante e predefinido.
- Cada uma destas unidades ou está disponível, ou está alocada para executar um e somente um processo de cada vez.
- Uma unidade de recurso só pode ser liberada pelo processo que a alocou.



## 4.2 GRAFOS DE ALOCAÇÃO E REQUISIÇÃO DE RECURSOS - GAR

Os modelos E-MFG de processos a serem executados para controle de um SAP identificam claramente e objetivamente todas as etapas que constituem cada um dos processos assim como todos os recursos que devem ser alocados para a execução de cada uma destas etapas. Entretanto, apesar de explicitar localmente as várias formas possíveis de compartilhamento destes recursos, o modelo E-MFG não representa explicitamente a seqüência de utilização dos recursos a nível global, pois o modelo por si não tem como prever em que instante cada etapa dos processos ativos no sistema será realizada.

Este é o motivo que justifica a utilização de grafos derivados de redes de Petri para representar conceitualmente a seqüência de passos de cada processo, isto é, as etapas e os recursos respectivamente alocados.

Um grafo do tipo GAR é constituído por nós e arcos orientados. Um par contendo um nó e o respectivo arco orientado de saída é denominado par de alocação enquanto um par contendo um nó e o respectivo arco de entrada é denominado par de requisição.

Em um par de alocação o nó representa um determinado recurso  $r_q$ ; de acordo com o modelo E-MFG desenvolvido para controlar os processos; e o arco orientado de saída possui uma inscrição fixa que representa a etapa do processo  $s_q(j)$  que aloca  $r_q$  para ser executada, conforme o grafo E-MFG mencionado anteriormente.

Por sua vez, em um par de requisição o nó também representa um determinado recurso  $r_q$  e o arco orientado de entrada possui uma inscrição fixa que representa a etapa do

processo  $s_q(i)$  que requisita  $r_q$ , para ser utilizado na próxima etapa do processo, de acordo com o respectivo grafo E-MFG de controle.

A Fig. 4.2 ilustra graficamente a representação destes pares para o caso de um mesmo produto em uma determinada etapa de sua seqüência de produção.

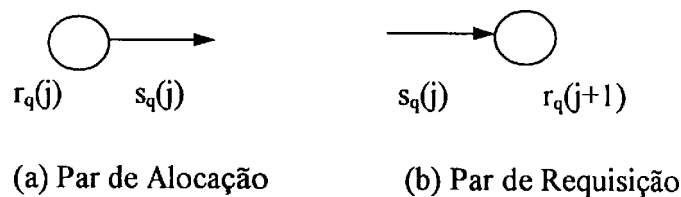


Fig. 4.2 Pares alocação e requisição de um mesmo produto em uma determinada etapa de sua seqüência de produção

Considerando-se o caso genérico de um processo modelado em E-MFG de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3, o modelo GAR correspondente é obtido aplicando-se diretamente as definições de pares de alocação e pares de requisição.

A Fig. 4.3 ilustra a correlação entre o modelo GAR e o modelo E-MFG de um processo em um SAP.

Considere a etapa  $s_q(1)$ , por exemplo, da seqüência de produção no modelo E-MFG da Fig. 4.3, representada pelo box  $Ps_q(1)$ . Para que esta etapa seja processada, uma unidade do recurso  $r_q(1)$  (representado pelo box  $Cr_q(1)$ ) é alocada assim que ocorre o evento correspondente ao início deste processamento (transição  $t_q(1)$ ). Assim que o processamento é finalizado  $t_q(2)$  dispara e a unidade do recurso  $r_q(1)$  é disponibilizada

novamente. Esta etapa é modelada no GAR considerando-se que  $r_q(1)$  (correspondente a  $Cr_q(1)$  em E-MFG) é alocado para realizar a etapa  $s_q(1)$  (correspondente a  $Ps_q(1)$  em E-MFG).

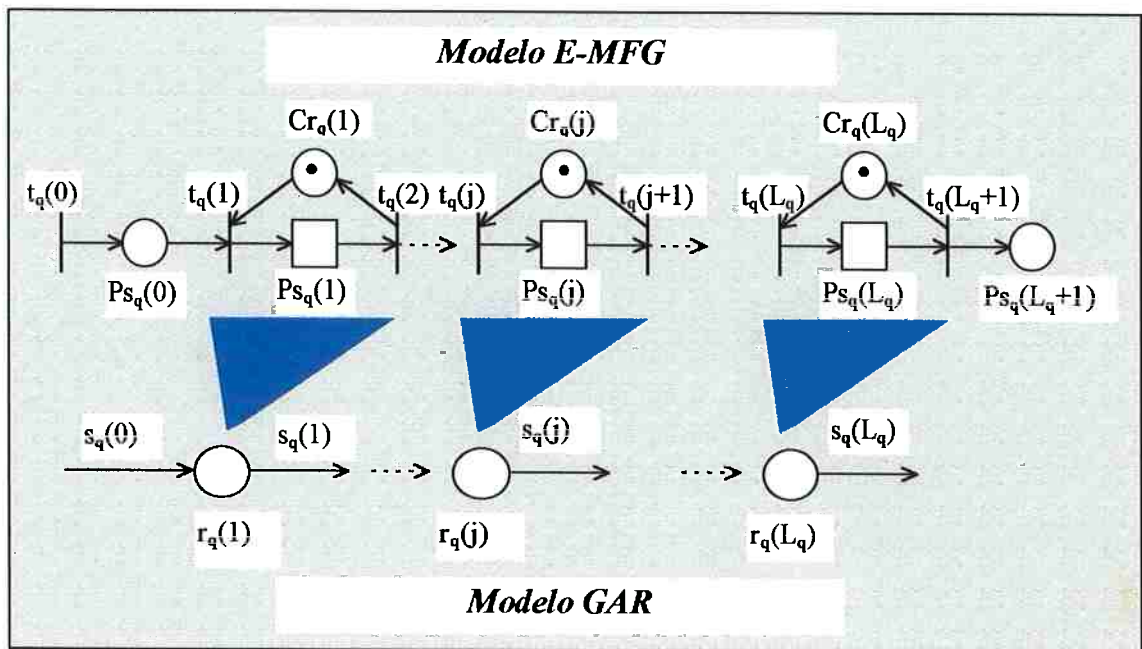


Fig 4.3 Correlação entre os modelos E-MFG de um processo e o modelo GAR correspondente

É importante salientar que o fato de utilizar-se elementos do tipo box simples para modelar as etapas de um processo está de acordo com as hipóteses assumidas em relação ao comportamento dos SAPs abordados e permite uma transcrição direta dos modelos E-MFG para os modelos GAR.

### 4.3 SEGMENTOS E CICLOS FECHADOS EM UM GAR

Considerando-se um conjunto de recursos  $r^*_q$  utilizadas para executarem a seqüência de produção  $p_q$  do produto  $q$ , se não houver compartilhamento de recursos, o modelo GAR correspondente não possuirá ciclos fechados (vide Fig. 4.3).

A seqüência de conexões entre os pares de alocação de uma determinada rota possui a mesma ordem da seqüência de produção do processo correspondente à rota em questão. Este procedimento de conectar-se os pares de alocação é definido como conexão contínua (HASEGAWA [1996]).

Por sua vez, considerando um modelo do tipo GAR correspondente a um sistema produtivo, onde há compartilhamento de recursos, tem-se um ciclo fechado quando:

- A rota de um determinado processo cruza-se sobre si mesma antes de atingir a etapa final da seqüência de produção. Corresponde à situação de compartilhamento de recursos para realização de um mesmo processo que, portanto, utiliza mais de uma vez os recursos compartilhados em sua seqüência de produção.
- As rotas de processos diferentes cruzam-se antes de atingirem as etapas finais de cada seqüência de produção. Corresponde ao caso em que os recursos compartilhados são utilizados de forma concorrente para a execução de uma variedade de processos diferentes.

Desta forma existem dois tipos básicos de ciclos fechados: um formado pela intersecção de uma única rota sobre si mesma e o outro formado pela intersecção de várias rotas

diferentes. Estes ciclos fechados em um GAR são denominados CFE - ciclos fechados de espera. O nó correspondente à intersecção é denominado *nó de intersecção*.

Considerando o procedimento de conexão contínua em um GAR em que há ciclos fechados, identifica-se o PAI (par de alocação de intersecção) como sendo o par de alocação que contém um determinado nó de intersecção. Por sua vez, o par de alocação que contém o arco que aponta para o nó de intersecção é denominado PAT (par de alocação terminal). Neste contexto, define-se ainda *segmento* como sendo a conexão contínua a partir de um determinado PAI até o próximo PAI.

Portanto, genericamente, um ciclo fechado é constituído por vários segmentos. A conexão de segmentos em um ciclo fechado é classificada como descontínua em virtude da não existência de uma rota única<sup>2</sup>. A Fig. 4.4 mostra os principais elementos de um GAR citados até o momento.

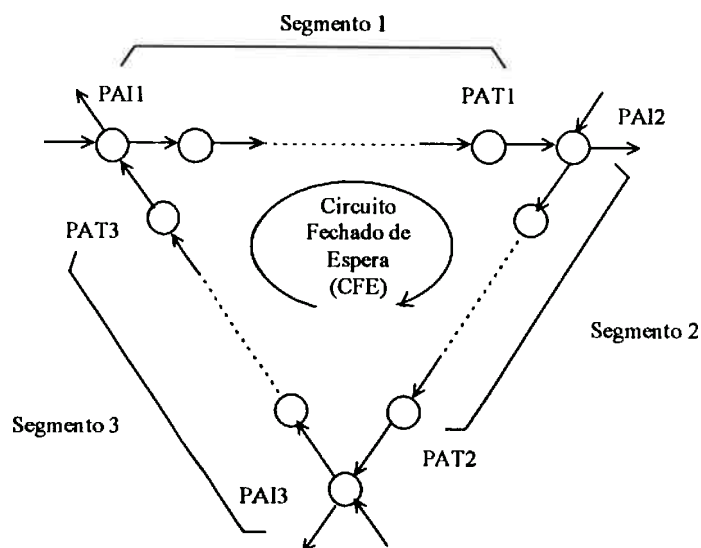


Fig. 4.4 Modelo GAR contendo CFE, PAI e PAT (HASEGAWA et al. [1996c])

<sup>2</sup> Um ciclo fechado de um GAR possui um único segmento quando o CEF for originado pela intersecção de uma única rota sobre si mesma.

#### 4.4 PROCEDIMENTO PARA EVITAR-SE 'DEADLOCK'

Um CFE pode atingir o estado em que todas as etapas ao longo do ciclo fechado estão na condição em que se verifica em cada uma delas a retenção do respectivo recurso enquanto aguarda a liberação do próximo (*retenção enquanto espera*), correspondendo, portanto, ao estado em que todos os recursos encontram-se alocados para executar a correspondente etapa de seqüência de produção contidas no ciclo em questão. Este estado é denominado *estado de retenção*, em analogia ao 'circular wait state' definido em HASEGAWA [1996]. Portanto, em princípio, qualquer CFE pode atingir o estado de retenção.

Considerando-se um par de alocação em que todas as unidades de recurso estão ocupadas e, simultaneamente, estas unidades estão executando o número máximo de etapas de produção possíveis, se houver uma requisição no sentido de avançar o processo para a próxima etapa, esta transição de estado não será habilitada e o estado corrente é de bloqueio.

Baseando-se no fato de que um CFE está no estado de retenção se e somente se todos os recursos do CFE estão ocupados, então, nesta situação, o estado de retenção corresponde ao estado de 'deadlock' do fluxo de materiais no sistema o que implica em afirmar-se que todos os segmentos deste circuito estão no estado de bloqueio, aguardando a liberação. Neste contexto, tem-se o seguinte teorema em HASEGAWA [1996]:

**Teorema 4.1** Supondo que um sistema possui apenas um CFE, o sistema está no estado de retenção se e somente se todos os pares de alocação do CFE estão bloqueados.

Portanto, o problema de 'deadlock' será abordado considerando-se a possível ocorrência de bloqueio dos pares de alocação.

O CFE de um GAR pode entrar no estado de 'deadlock' se os recursos estiverem sendo utilizados de maneira que os segmentos encontram-se bloqueados. Para evitar-se o 'deadlock' é necessário acrescentar elementos compensadores que impeçam o bloqueio destes segmentos do CFE.

Uma vez que os processamentos no interior do circuito necessariamente atravessam o nó de intersecção, isto é, o PAI, verifica-se que compensando o recurso associado ao PAI para que não haja bloqueio é possível evitar-se que o segmento fique bloqueado. Esta estratégia de controle para evitar-se a ocorrência de 'deadlock' é denominada FIS - Flow-in Suppression (BANASZAK; KROGH [1990], HASEGAWA et al. [1996a], HASEGAWA et al. [1996b]).

#### **4.4.1 Métodos de Compensação Baseados em FIS**

Uma situação de 'deadlock' no fluxo de materiais ocorre devido ao desbalanceamento entre o número de processamentos que entram e saem do sistema.

A estratégia FIS consiste em colocar um elemento de compensação no PAI e, portanto, no respectivo grafo PFS-R/E-MFG<sup>3</sup> de controle dos processos. No caso do grafo PFS-R/E-MFG o elemento adotado será um box do tipo capacidade.

---

<sup>3</sup> A abordagem está sendo realizada em termos de grafos PFS-R/E-MFG porque, para uma situação genérica, o modelo que representa a alocação de recursos da forma sugerida pode ainda não corresponder ao nível de detalhamento máximo desejado para realizar-se o controle.

De acordo com HASEGAWA [1996] e HASEGAWA et al. [1996a] para evitar-se o 'deadlock' é suficiente realizar a compensação em apenas um dos segmentos do ciclo fechado.

Baseado em HASEGAWA et al. [1996c] descreve-se, a seguir, quatro técnicas fundamentais de compensação que podem ser aplicadas para obter-se uma solução para o problema e simultaneamente assegurar-se uma dinâmica eficiente para o SAP.

#### (1) Compensação Simples

É aplicada sempre que os recursos de um determinado PAI são múltiplos e não pertencem a nenhum outro PAI. Esta técnica consiste em adicionar-se um elemento compensador em paralelo com o próprio PAI e a marcação inicial do box compensador é dada pela expressão 4.2.

$$M_0(c) = M_0(Cr_i) - 1 \quad (4.2)$$

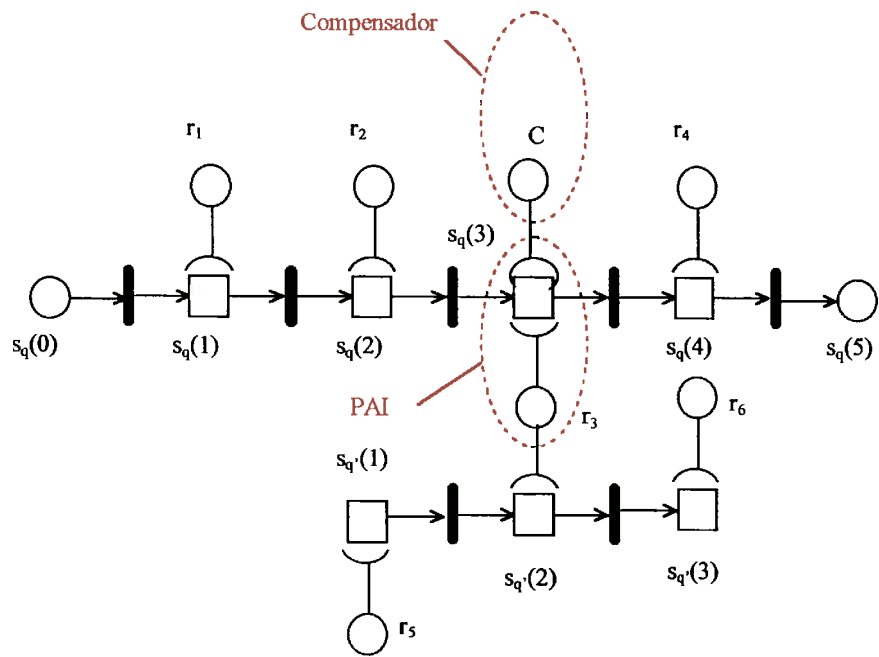
Onde:

$c$  é o box capacidade que representa o compensador em E-MFG

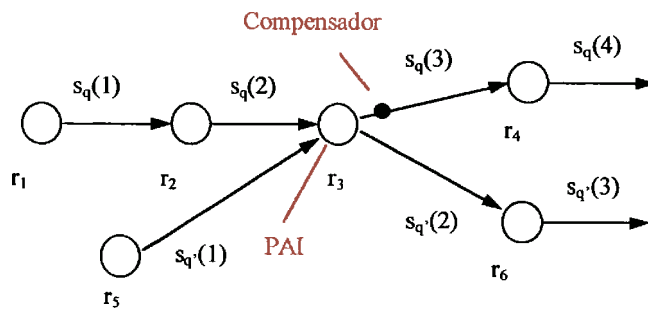
$Cr_i$  é o box capacidade que representa as unidades do recurso  $r_i$ .

A Fig. 4.5 ilustra como representar o elemento compensador em um grafo do tipo PFS-R/E-MFG e num grafo GAR.





(a) Modelo PFS-R/E-MFG



(b) Modelo GAR

Fig. 4.5 Representação do compensador simples

(2) Compensação por Segmento

Este método que é uma extensão da compensação simples incorpora os pares alocação adjacentes ao PAI e que pertencem ao mesmo segmento.

De um modo geral, a marcação inicial do compensador é dada pela

expressão 4.3, onde  $M_0(Cr_i)$  representa a marcação correspondente à quantidade de recursos do PAI e dos recursos que serão agregados.

$$M_0(c) = \sum M_0(Cr_i) - 1 \quad (4.3)$$

Onde:

$c$  é o box capacidade que representa o compensador em E-MFG

$Cr_i$  é o box capacidade que representa as unidades do recurso  $r_i$ .

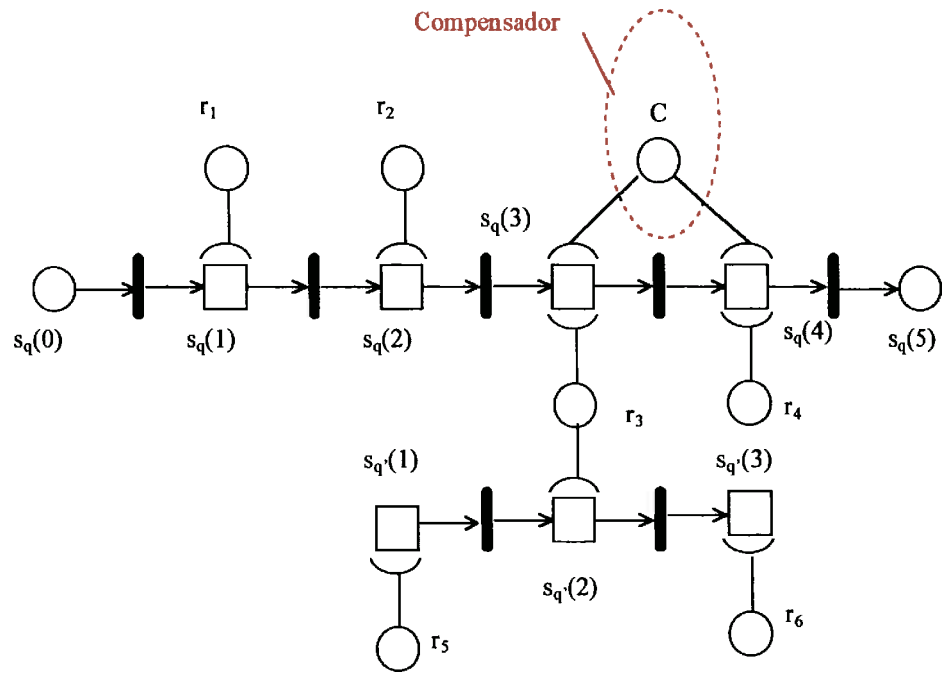
De acordo com HASEGAWA et al. [1996c] esta técnica aumenta a eficiência de utilização dos recursos, uma vez que as restrições passam a ser delegadas para os demais recursos de um mesmo segmento. Outro fator positivo desta técnica consiste em aplicá-la nos casos em que deveria ser utilizada a técnica de compensação simples mas a quantidade de recursos do PAI é unitária.

Em um grafo PFS-R/E-MFG um box compensador é adicionado envolvendo o PAI e seu vizinho adjacente. A Fig. 4.6 ilustra um exemplo de compensação utilizando esta técnica.

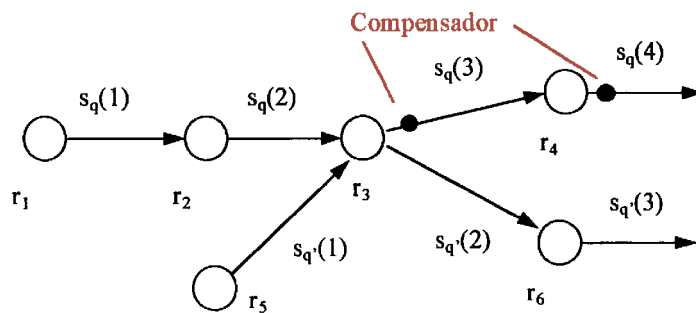
### (3) Compensação Complexa

Esta técnica pode ser aplicada quando existem diversos segmentos no ciclo fechado. Se um determinado PAI é o único par alocação de um segmento e precisa ser compensado, então deve ser compensado

conjuntamente com um PAI de outro segmento para que as restrições sejam distribuídas, aumentando-se a eficiência do sistema.



(a) Modelo PFS-R/E-MFG

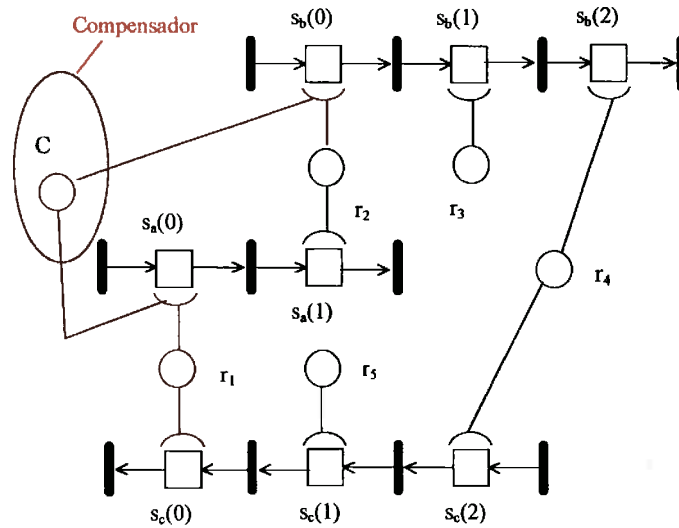


(b) Modelo GAR

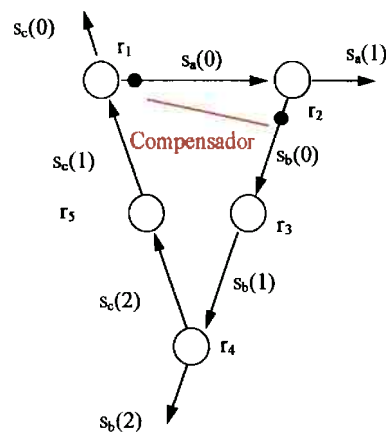
Fig. 4.6 Exemplo de compensação por segmento

Quanto a marcação inicial do compensador, é análoga à expressão 4.3 aplicada para o caso de compensação por segmento.

A Fig. 4.7 mostra um exemplo em que é aplicado este tipo de compensação.



(a) Modelo PFS-R/E-MFG



(b) Modelo GAR

Fig 4.7 Exemplo de compensação complexa

#### (4) Compensação em Comum

Este método é utilizado para compensar os PAIs que possuem recursos em comum. Sempre que um recurso pertencer a dois ou mais PAIs utiliza-se este método para compensá-los. Nesta situação, apenas um compensador é adicionado em comum para todos os PAIs a serem compensados. A marcação inicial do compensador é dada pela expressão 4.4.

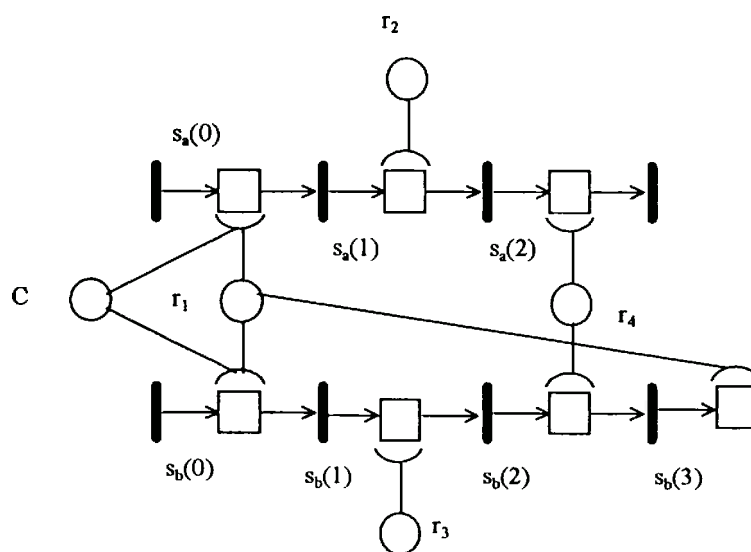
$$M_0(c) = M_0(Cr_i) - 1 \quad (4.4)$$

A Fig. 4.8 ilustra um exemplo onde um recurso é comum para dois PAIs. Aplicando-se esta técnica de compensação, existirá sempre um recurso em  $r_1$  para que um determinado processamento finalizado possa sair do ciclo.

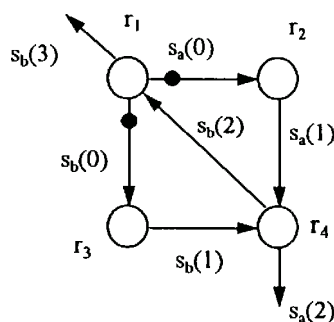
#### **4.4.2 Detecção dos Ciclos Fechados em um GAR**

A detecção dos CFE em um modelo GAR torna-se cada vez mais trabalhosa à medida em que cresce o nível de complexidade da estrutura e do comportamento dinâmico do sistema produtivo que se está modelando.

Portanto, é interessante especificar um método para identificar os CFEs de um GAR. Neste sentido, é introduzido a seguir um procedimento para detecção de CFEs de um GAR baseado nos trabalhos HASEGAWA et al. [1996b] e HASEGAWA et al. [1996c].



(a) Modelo PFS-R/E-MFG



(b) Modelo GAR

Fig. 4.8 Exemplo de compensação em comum

**Definição 4.1** Seja  $GAR = (R, A)$  um grafo orientado, onde  $R = \{R_1, \dots, R_n\}$  é o conjunto de recursos e  $A$  é o conjunto de pares ordenados  $(R_i, R_j)$  de recursos com  $i \neq j$ . Considere a matriz  $G = (a_{ij})$  dada por :

$$a_{ij} = s_{ij} \text{ se } (R_i, R_j) \in A;$$

$$a_{ij} = 0 \text{ se } (R_i, R_j) \notin A;$$

Onde  $s_{ij}$  representa a etapa de produção inscrita no arco de  $R_i$  para  $R_j$ .

A matriz  $G$  assim construída denomina-se matriz associada ao grafo GAR (HARARI [1971], CALLIOLI et al. [1978]).

**Teorema 4.2** Seja  $GAR = (R, A)$  um grafo orientado e  $G$  a sua respectiva matriz. Então o número de caminhos de comprimento  $p$  ligando o vértice  $R_i$  a  $R_j$  é o elemento de posição  $(i, j)$  da matriz  $G^p$  (CALLIOLI et al. [1978]).

*Demonstração.* Para  $p=2$ , a demonstração é essencialmente a seguinte: o elemento  $b_{ij}$  da matriz  $G^2$  é dado por  $b_{ij} = \sum a_{ik} a_{kj}$ , onde  $(a_{ij}) = G$ . Para que se tenha  $a_{ik} a_{kj} = 1$  é necessário e suficiente que  $a_{ik}=1$  e  $a_{kj}=1$ . Isto corresponde à situação acima, em que se tem um caminho de comprimento 2 unindo  $R_i$  a  $R_j$ .

Assim,  $b_{ij}$  é igual ao número de vértices  $R_k$  na situação acima. Para  $p>2$ , usa-se a indução, lembrando que  $G^p = G^{p-1}G$ .

Baseado na Definição 4.1 o grafo GAR pode ser representado pela matriz  $G$ . Nesta matriz, os seus elementos representam as etapas de produção das seqüências produtivas de cada processo a ser executado no sistema. Estes elementos são representados na matriz em sua forma paramétrica porque o interesse está em identificar-se a rota de cada produto no sistema.

Neste contexto, aplicando-se o teorema 4.2 é possível determinar-se os ciclos fechados do GAR realizando-se a operação de potenciação da matriz  $G$ . Assim, conforme surge um elemento  $g_{ii}$  não nulo na diagonal principal da matriz  $G^p$ , a expressão contida neste

elemento representa todas as possíveis rotas que partem do recurso  $R_i$  e retorna a ele mesmo, para o caso em que o comprimento da rota é  $p$ . Desta forma, obtêm-se efetivamente os ciclos fechados necessários.

Entretanto, para detectar-se estes ciclos fechados, a cada passo de multiplicação das matrizes em que se obtém  $G^p$  correspondente à potenciação da matriz  $G$ , deve-se eliminar os elementos da diagonal principal de  $G^p$  para que não sejam computados ciclos reentrantes.

O procedimento de potenciação é aplicado até que  $G^p$  se anule ou então, até que  $p$  seja igual a  $N$ , onde  $N$  é a ordem da matriz. Não é necessário incrementar  $p$  além de  $N$  porque isto significaria buscar circuitos cujo comprimento excede o número de pares  $(R_i, R_j)$  existentes e, portanto, isto significaria percorrer um mesmo par mais de uma vez implicando em reentrância para gerar-se um CFE.

Baseado nesta abordagem a Fig. 4.9 representa o algoritmo proposto para a obtenção dos CFEs de um GAR.

Portanto, como resultado da aplicação do algoritmo da Fig. 4.9 obtém-se uma lista dos CFEs da matriz  $G$  correspondente ao GAR.

#### 4.4.3 Determinação dos Compensadores

De acordo com o teorema 4.2 o elemento de posição  $(i, j)$  da matriz  $G^p$  retorna o número de caminhos de comprimento  $p$  ligando o vértice  $R_i$  a  $R_j$ . Esta afirmação baseia-se na hipótese de que a matriz  $G$  é binária, isto é, se existe um arco orientado ligando os



vértices então  $g_{ij}$  é igual a unidade, caso contrário é zero (CALLIOLI et al. [1978]). Entretanto, uma vez que a matriz  $G$  está parametrizada, no caso em que existe um arco orientado ligando os vértices, na posição  $g_{ij}$  registra-se a inscrição que há sobre este arco e que corresponde a uma determinada etapa de um determinado processo a ser executado no SAP.

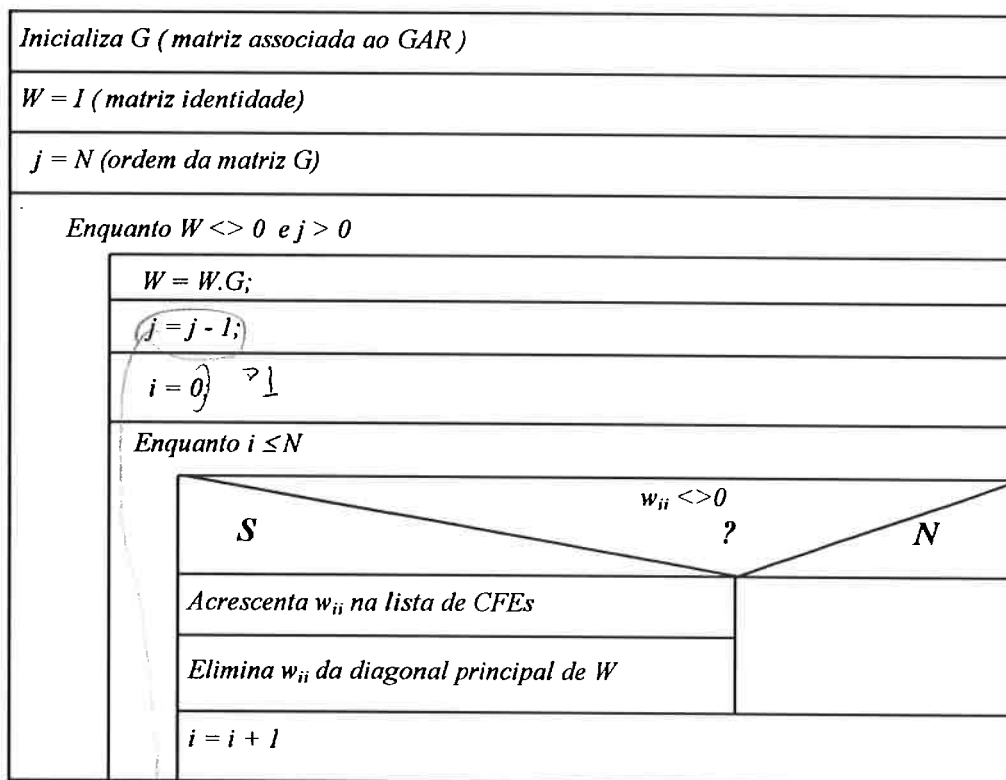


Fig. 4.9 Algoritmo para obtenção dos CFEs de um GAR

Considerando-se estas premissas, o elemento  $g_{ij}$  da matriz  $G^P$  retorna uma expressão de acordo com 4.5.

$$g_{ij} = \sum_{k=1}^m \left( \prod_{l=1}^p s_x \right) \quad (4.5)$$

Onde:

$g_{ij}$  é o elemento de posição  $(i, j)$  na matriz  $G^P$ .

$p$  é a potência da matriz e, portanto, o comprimento dos caminhos.

$m$  é o número de caminhos de comprimento  $p$ .

$s_x$  é uma etapa genérica de um determinado processo que pertence ao caminho em questão.

Portanto, a expressão 4.5 consiste em uma somatória de produtos sendo que cada variável é binária por definição (teorema 4.2). Desta forma, esta expressão pode ser considerada uma expressão Booleana, em que a somatória deve ser interpretada como a aplicação do operador 'OR' e a produtória corresponde a aplicação do operador 'AND' (LANGDON; FREGNI [1977]).

Estabelecido o fato de que cada um dos elementos da matriz  $G^P$  pode ser interpretado como uma expressão Booleana, a próxima etapa consiste em determinar-se um conjunto de PAIs que devem ser compensados para garantir que não ocorra 'deadlock' no SAP.

Para obter-se este conjunto de PAIs há três procedimentos básicos que são abordados neste trabalho:

- a) Determinação por simples observação.
- b) Determinação por aplicação direta de mapas de Karnaugh.

c) Determinação por absorções sucessivas.

Em relação ao primeiro procedimento, consiste em observar-se as expressões Booleanas obtidas através da potenciação da matriz G. Para aplicar-se a estratégia FIS (BANASZAK; KROGH [1990], HASEGAWA et al. [1996]), de acordo com HASEGAWA et al. [1996b] é necessário decidir-se inicialmente qual a etapa de seqüência de produção deve ser escolhida visando a determinação do conjunto de PAIs adequados. Para isto, considerou-se o procedimento a seguir:

1. Define-se como etapa de seqüência de produção do PAI aquela que corresponder à etapa mais próxima do início de um determinado segmento.
2. Define-se este PAI como um elemento a ser compensado.
3. Considera-se o elemento acima identificado como sendo um elemento nulo, bem como os demais PAIs selecionados anteriormente (se for o caso deste procedimento já ter sido aplicado anteriormente)
4. Verifica-se a expressão Booleana correspondente aos CFEs. Se for anulada (corresponde a determinar o grau de intersecção deste PAI com todos os CFEs existentes no sistema), fim do procedimento, caso contrário, volta para etapa 1.

Aplicando-se este procedimento e verificando-se o comportamento das expressões Booleanas é possível obter um conjunto de PAIs que devem ser compensados. Entretanto, à medida em que aumenta a complexidade operacional do sistema, congestionando o respectivo GAR, esta abordagem torna-se inadequada. Neste sentido, considera-se os procedimentos (b) e (c) citados anteriormente.

Estes procedimentos são úteis para manipular-se as expressões Booleanas no sentido de obter-se os PAIs que sejam mais adequados para a compensação, isto é, que interseccionem o número máximo possível de ciclos fechados encontrados. Este problema é semelhante ao de simplificação de expressões Booleanas para a síntese de circuitos combinatórios (LANGDON; FREGNI [1977]).

Baseado nesta hipótese, é possível aplicar-se a técnica tradicional de mapear estas expressões em mapas de Karnaugh, para obter-se primeiramente os cubos de maior ordem e, consecutivamente, os pontos de intersecção destes cubos que constituem cada um dos CFEs existentes no sistema.

Este procedimento é relativamente simples (LANGDON; FREGNI [1977]). Deste modo, é possível determinar o menor número possível de pontos de intersecção que englobam todos os cubos e que se constituem, portanto, no conjunto mínimo de PAIs a serem compensados.

Caso a matriz  $G^P$  gere um número elevado de elementos para serem simplificados através de mapas de Karnaugh, pode-se utilizar o procedimento (c) que consiste em aplicar-se a propriedade distributiva ( $AB + AC = A(B + C)$ ) e o teorema da absorção da álgebra Booleana (teorema 4.3) adequadamente.

**Teorema 4.3** Sejam  $A$  e  $B$  variáveis binárias, então têm-se:

$$A + A.B = A \Leftrightarrow A.(A + B) = A$$

Inicialmente aplica-se este teorema sistematicamente, ordenando-se os CFEs por comprimento de caminho. Desta forma, a partir das expressões de tamanho máximo  $p$ , verifica-se quais podem ser absorvidas pelas expressões de tamanho  $p-1$  e assim

sucessivamente. Por fim restam as expressões que não podem ser mais absorvidas. Aplicando-se a propriedade distributiva sistematicamente entre os CFEs de um mesmo comprimento e, posteriormente, entre comprimentos diferentes, é possível estimar-se os pontos de intersecção adequados, uma vez que serão candidatos a uma “*compensação em comum*” que mostra-se ser mais eficiente, considerando também o procedimento para determinação dos PAIs descritos anteriormente.

Definido o conjunto de PAIs a serem compensados, finaliza-se o processo de compensação adicionando elementos compensadores de acordo com os critérios de compensação descritos anteriormente na seção 4.4.1.

#### **4.5 EXEMPLO APLICATIVO**

Nesta seção apresenta-se um exemplo de aplicação das técnicas apresentadas neste Capítulo para o projeto de compensadores que evitam a ocorrência de ‘deadlock’ em virtude do gerenciamento do fluxo de itens.

Trata-se de um SAP capaz de produzir diversos produtos simultaneamente, segundo diferentes seqüências de operações associadas a cada um destes produtos. A parte operativa do sistema constitui-se de várias estações de trabalho e o fluxo de materiais é realizado por um sistema de transporte baseado em VTs dirigidos por motoristas, baseado no estudo de caso apresentado em SANTOS FILHO [1993].

De acordo com o modelo estrutural descrito na Fig. 4.10, o SAP em estudo é constituído pelos seguintes elementos:

- Quatro estações de trabalho para processamento: EST\_1, EST\_2, EST\_3 e EST\_4.
- Cada uma destas estações possui um magazine de entrada (B\_IN) e um magazine de saída (B\_OUT) sendo que cada um deles possui capacidade para armazenar um elemento, bem como uma máquina-ferramenta que processa um produto por vez.
- Uma estação de entrada de materiais (EST\_IN) que armazena o estoque de matéria-prima que abastece as estações de trabalho.
- Uma estação de saída (EST\_OUT) que armazena os estoques de produtos acabados.
- Três VTs.
- Um estacionamento (ESTAC) para os VTs.

Para a realização do fluxo de materiais entre as estações, os VTs movimentam-se sobre um circuito de via única, transportando um produto de cada vez. Neste circuito, há vários pontos de ramificação e confluência correspondentes aos desvios para a entrada e saída dos VTs nas várias estações e estacionamento. À medida que os produtos são processados, os VTs são requisitados pela estação correspondente e a retirada dos produtos dos magazines de saída é realizada na ordem FIFO.

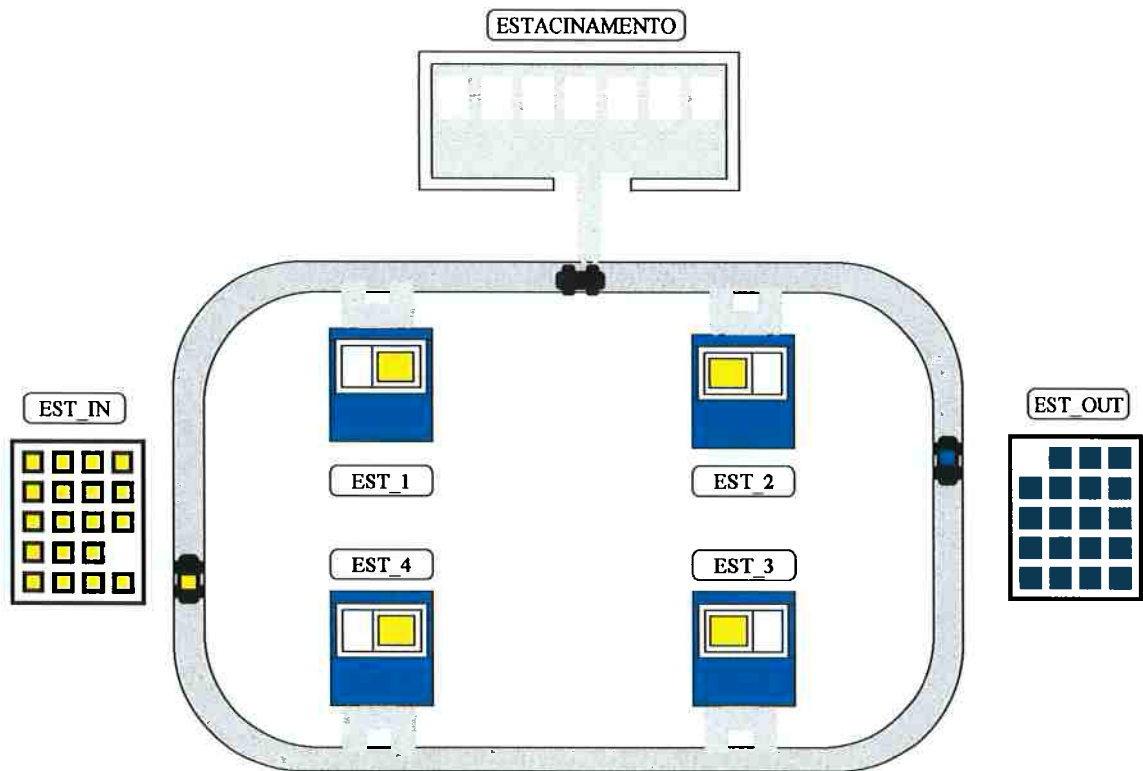


Fig 4.10 Modelo estrutural do SAP a ser estudado

No presente sistema, fabrica-se três tipos de produtos: *PROD\_A*, *PROD\_B* e *PROD\_C*. Cada um destes produtos possui uma determinada seqüência de operações que utiliza os recursos de acordo com as relações (4.6) a (4.11) descritas a seguir:

- Para o produto *PROD\_A* têm-se:

$$r^*_A = \{ B\_INA, EST\_1, EST\_2, EST\_3, EST\_4, B\_OUTA \} \quad (4.6)$$

$$p_A = \{ s_A(0), s_A(1), s_A(2), s_A(3), s_A(4), s_A(5) \} \quad (4.7)$$

- Para o produto *PROD\_B* têm-se:

$$r^*_B = \{ B\_INB, EST\_2, EST\_1, EST\_3, B\_OUTB \} \quad (4.8)$$

$$p_B = \{ s_B(0), s_B(1), s_B(2), s_B(3), s_B(4) \} \quad (4.9)$$

- Para o produto *PROD\_C* têm-se:

$$r^*_C = \{ B\_INC, EST\_3, EST\_2, EST\_1, EST\_4, B\_OUTC \} \quad (4.10)$$

$$p_C = \{ s_C(0), s_C(1), s_C(2), s_C(3), s_C(4), s_C(5) \} \quad (4.11)$$

Baseado nestas especificações obtém-se o grafo PFS-R/E-MFG da Fig. 4.11 em que se representa efetivamente cada um dos processos divididos em suas respectivas etapas produtivas e os correspondentes recursos envolvidos, representando também o compartilhamento destes recursos quando necessário (o E-MFG correspondente à movimentação dos VTs é detalhado em SANTOS FILHO [1993]).

Assim, a partir o grafo da Fig.4.11 deriva-se o GAR correspondente, apresentado na Fig. 4.12 onde são visualizados claramente os ciclos fechados de fluxo de itens que podem ocasionar 'deadlock' no sistema.

Para obter-se uma expressão Booleana que represente todos os CFEs existentes no GAR apresentado na Fig. 4.12 aplica-se sistematicamente o procedimento da Fig. 4.9 a partir da matriz *G* que é uma representação na forma matricial deste mesmo GAR, de acordo com a equação (4.12).

$$G = \begin{bmatrix} 0 & s_A(1) & s_B(2) & s_C(3) \\ s_B(1) + s_C(2) & 0 & s_A(2) & 0 \\ 0 & s_C(1) & 0 & s_A(3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

A expressão Booleana obtida é representada pela expressão (4.13).



$$\left[ (s_B(1) + s_C(2)) \cdot (s_C(1) \cdot s_B(2) + s_A(1)) + s_A(2) \cdot s_C(1) \right] \quad (4.13)$$

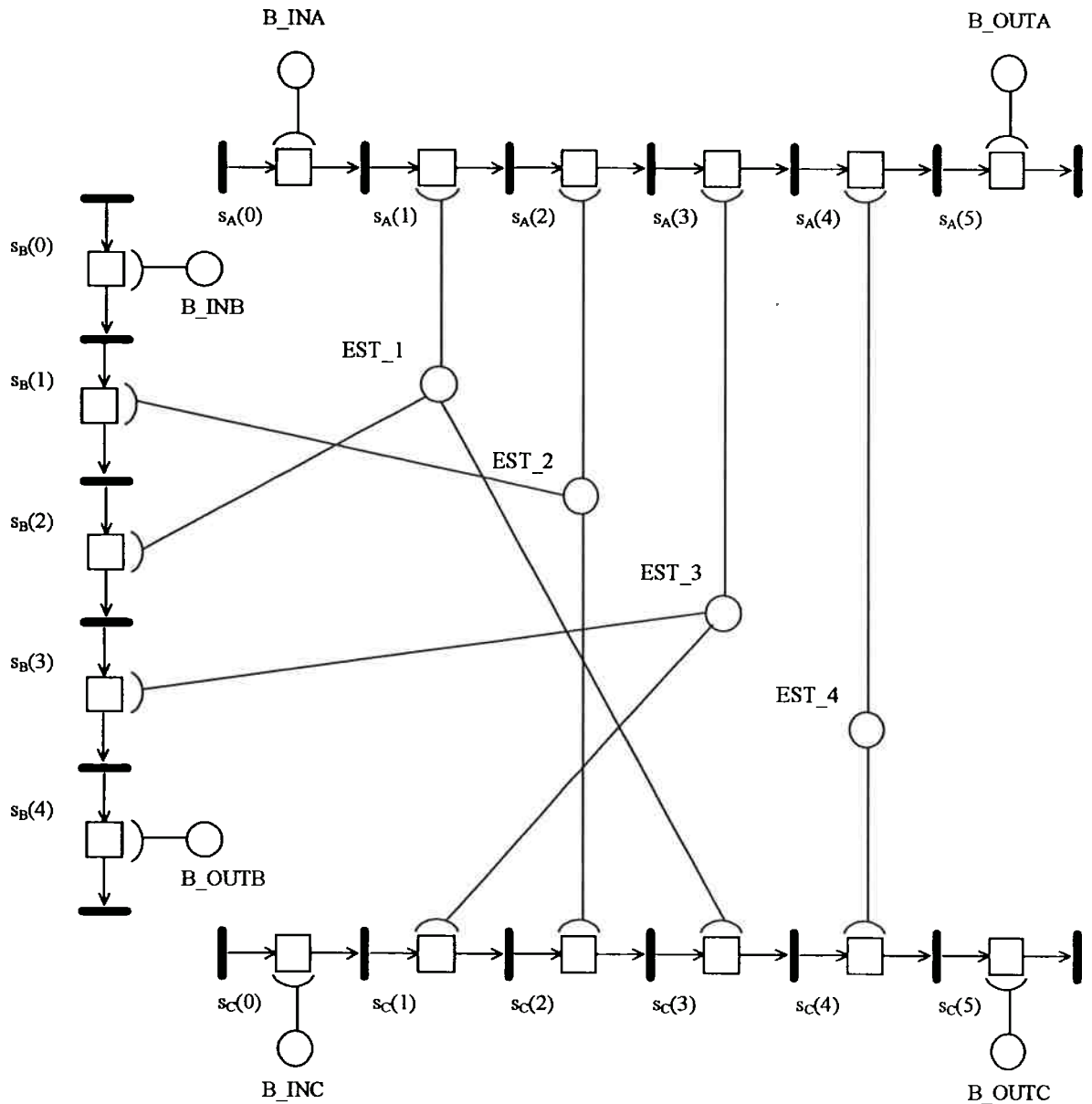


Fig. 4.11 Modelo PFS-R/E-MFG correspondente aos processos a serem executados

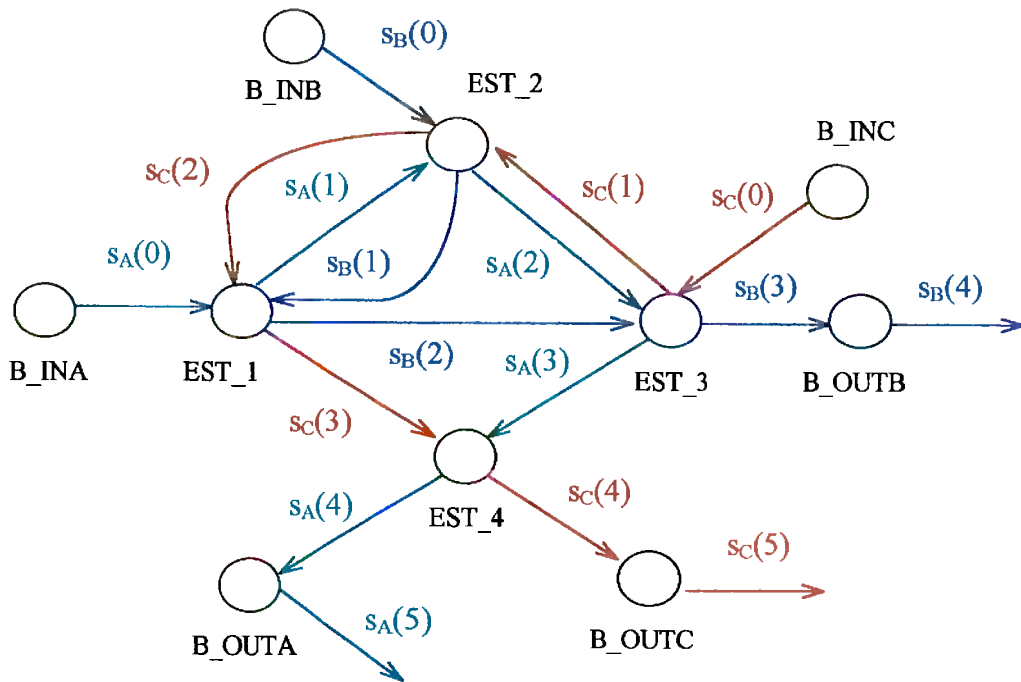


Fig. 4.12 GAR correspondente ao sistema em estudo

Aplicando-se o procedimento para obtenção dos PAIs adequados para a compensação conforme descrito na seção 4.4.3, considerando  $s_A(1)$  como candidato inicial obtêm-se como resultado dois PAIs para serem compensados, de acordo com as expressões (4.14a) e (4.14b).

$$PAI_1 = (EST_3, s_C(1)) \quad (4.14a)$$

$$PAI_2 = (EST_1, s_A(1)) \quad (4.14b)$$

Em relação ao método de compensação a ser implantado, considerando-se o  $PAI_1$  observa-se que o recurso EST\_3 é unitário, inviabilizando a compensação simples. Por sua vez, como é o único par de alocação deste segmento do CFE ( $s_C(1)$ ,  $s_C(2)$ ,  $s_B(2)$ ), pode-se utilizar o método de compensação complexa, inserindo-se o compensador  $c_1$ , de

acordo com a Fig. 4.13. A marcação deste compensador  $c_1$  é unitária uma vez que os recursos também o são. Analogamente projeta-se o compensador  $c_2$ .

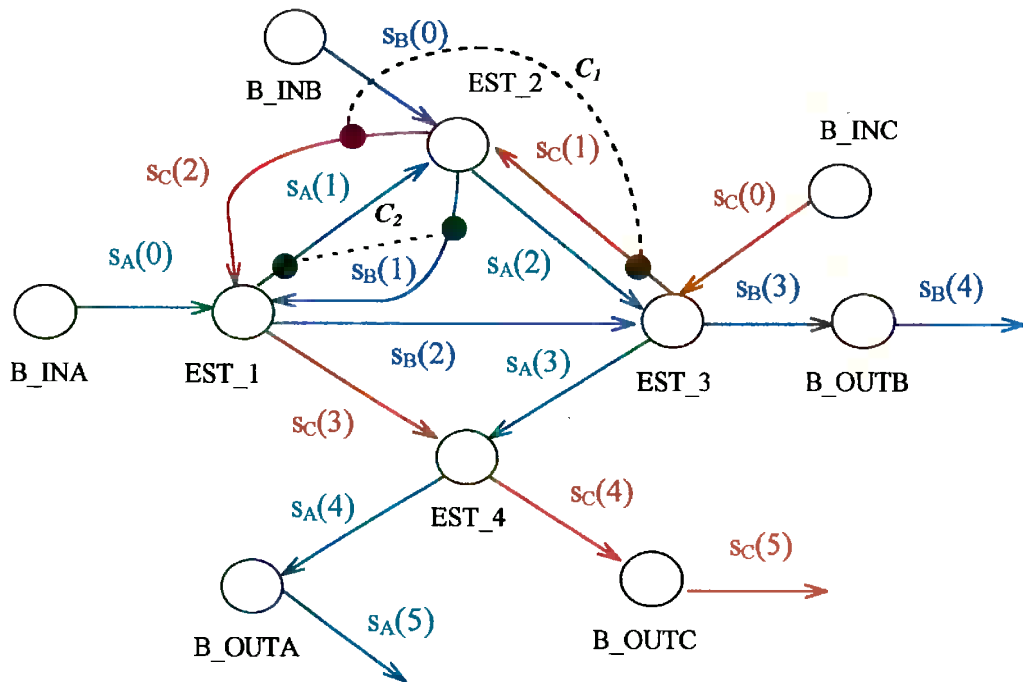


Fig. 4.13 GAR com compensadores correspondente ao sistema em estudo

Finalizando, a Fig. 4.14 apresenta o grafo PFS-R/E-MFG compensado que elimina a ocorrência de 'deadlock' no sistema devido ao fluxo de itens durante a evolução dos processos.

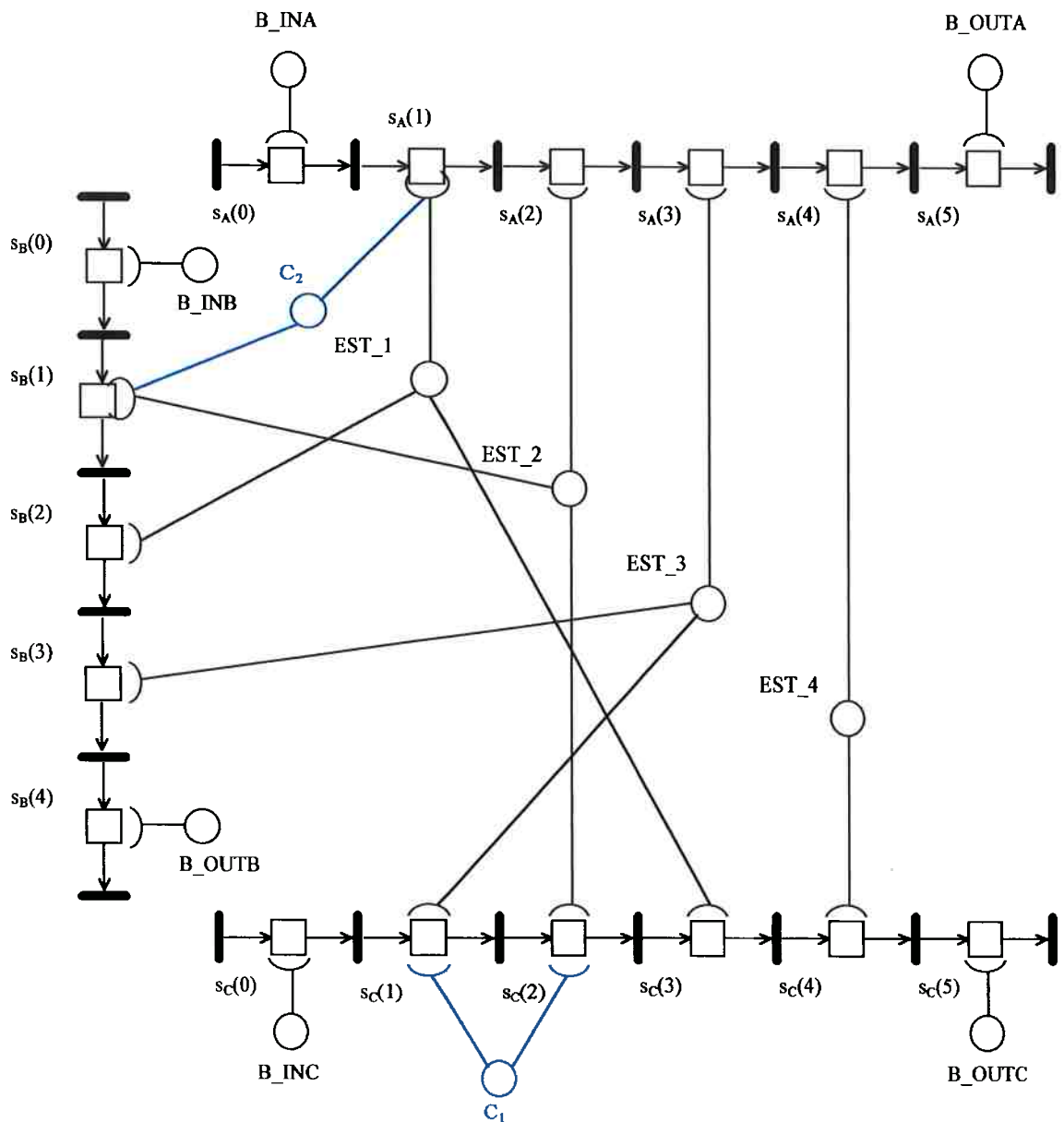


Fig. 4.14 Modelo PFS-R/E-MFG corresponde aos processos a serem executados

#### 4.6 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES

Neste Capítulo apresentou-se inicialmente uma caracterização de 'deadlock' em SAPs, identificando-se claramente as condições necessárias que permitem a ocorrência do mesmo. Em seguida apresentou-se a técnica de modelagem dos SAPs através de grafos

de alocação e requisição de recursos (GAR) onde se definiu os conceitos de segmento e ciclo fechado (CFE).

No sentido de evitar-se o 'deadlock' apresentou-se um procedimento que se utiliza do modelo GAR para identificar os CFEs presentes no sistema e, a partir da análise destes ciclos determina-se um conjunto de PAIs (pares alocação-recurso de intersecção) adequados para serem compensados. Finalmente, propõe-se os elementos compensadores adequados para evitar-se o 'deadlock' do sistema.

Ainda neste Capítulo apresenta-se um exemplo de aplicação destas técnicas no projeto de compensadores adequados para evitar-se o travamento do sistema.

No sentido de estender-se o conceito de SAPs introduzido neste trabalho, no Capítulo 5 coloca-se em prática os princípios de uma abordagem antropocêntrica para a solução do problema de controlar-se o fluxo de veículos de transporte em um SAP, considerando veículos dirigidos por motoristas, implantando-se o conceito de reatividade nestes sistemas, considerando o elemento humano como gerador de eventos que comandam esta reatividade.

## CAPÍTULO 5

# OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE VEÍCULOS DE TRANSPORTE EM SAPs

Os transportadores podem ser classificados em dois grandes grupos, de acordo com a aplicação a que se destinam (INAMASU [1995]; WANKE[1996]):

- Transportadores para rotas fixas. São os transportadores normalmente acionados por roletes, por correias, com camada de ar e modulares que podem ser utilizados em situações onde as rotas são fixas.
- Transportadores para rotas genéricas. Neste caso existem os veículos autônomos de transporte e os veículos que dependem do manuseio de um operador. São aplicados em situações que envolvem a necessidade de transportadores capazes de realizarem rotas alternativas para o transporte de materiais de acordo com a evolução do comportamento dinâmico do sistema de produção.

Ainda que um sistema de transporte baseado em veículos de transporte envolva custos mais elevados, é uma opção que apresenta vantagens que podem influenciar decisivamente no desempenho do sistema, principalmente em casos onde se processa

uma variedade de produtos diferentes simultaneamente, como ocorre nos SAPs. Nestas situações, têm-se como benefícios fundamentais:

- Garantia de um elevado nível de flexibilidade operacional uma vez que possibilita a alteração de rotas com acesso direto às estações de carga e descarga.
- Capacidade de alterar as rotas para manter o fluxo de itens adequado às reprogramações do controle da produção.

Desta forma, considerando que os fluxos de materiais e de informações são os principais objetos de controle de SAPs, este Capítulo explora como exemplo de otimização de desempenho o sistema de movimentação de partes.

No Capítulo anterior foi apresentada a técnica PFS-R/E-MFG para modelar e controlar o sistema produtivo. Esta técnica permite o desenvolvimento da estratégia de controle que atua no sistema ao nível de decisão, por exemplo, de qual requisição de transporte deve ser atendida. Entretanto, este controle não considera a alocação dos veículos de transporte (VTs) de acordo com as requisições, porque a técnica PFS-R /E-MFG não suporta a coexistência de indeterminação relacionada com a dinâmica de movimentação destes veículos que é função da experiência dos motoristas.. Assim, faz-se necessário agregar-se outras técnicas de modelagem e processamento de informações capazes de tratar e solucionar este tipo de problema.

Em outras palavras, através das abordagens apresentadas anteriormente, tem-se uma solução para o conflito de qual requisição de transporte deve ser atendida sem que exista um comprometimento do desempenho dinâmico do SAP. Entretanto, o problema que

persiste é o de garantir uma distribuição estratégica dos veículos de transporte (VTs) nas áreas úteis que constituem a planta do sistema produtivo de modo a maximizar a eficiência na realização do transporte de materiais pelos VTs.

Este conceito de otimização (maximização da eficiência) deve ser interpretado aqui como uma distribuição homogênea dos VTs na planta, definida em função da demanda de transporte de cada estação de carga/descarga do sistema.

A motivação para abordar-se este tipo de problema reside no fato de que depois de algum tempo em operação, em geral ocorre uma polarização (concentração) de VTs em torno de determinado(s) centro(s) de demanda que causa uma degradação do desempenho dinâmico do sistema. Primeiramente ocorrem problemas relacionados à congestionamento das vias de tráfego dos VTs e, em segundo lugar, gera um comprometimento do tempo de atendimento do sistema de transporte em ambientes de elevada produtividade.

Uma vez que não compete ao “controle de navegação” embarcado no VT atuar sobre este nível de controle, é fundamental que se desenvolvam soluções ao nível de supervisão das tarefas dos VTs para a manutenção contínua de uma distribuição homogênea de VTs que garanta um desempenho adequado do SAP frente a este problema que o sistema de transporte pode apresentar.

Prosseguindo-se com a abordagem de SAPs, pretende-se aplicar os princípios de sistemas antropocêntricos no controle de sistemas de transporte. Neste sentido, considera-se como objeto de estudo o desenvolvimento de procedimentos de controle de sistemas de transporte baseados em veículos autônomos de transporte (VTs); em geral, dirigidos por motoristas treinados.



Em INAMASU [1995] é proposta uma plataforma para a simulação e o planejamento de sistemas de manufatura em que se considera efetivamente a modelagem de todas as partes do sistema, identificando-se os procedimentos para a modelagem das estações de trabalho, dos veículos de transporte, das rotas de transporte e dos processos alternativos de fabricação através de RdP temporizadas. Entretanto, considerando-se o caso dos SAPs, para modelar-se o sistema de transporte, deve-se incluir o elemento humano e sua interação na dinâmica do sistema, considerando o conhecimento que os operadores possuem a respeito da planta e do arranjo físico do sistema em que trafegam para realizar o transporte de materiais. Neste sentido, o problema de representação das rotas é minimizado, pois os próprios operados possuem o conhecimento necessário para decidir qual o percurso mais adequado quando é preciso deslocar-se de uma determinada origem para um certo destino.

Sendo assim, em uma primeira instância, o controle dos VTs restringe-se a especificar pares origem-destino que os transportadores devem percorrer para realizar o fluxo de materiais. O problema maior consiste em estabelecer-se um procedimento que designa cada um dos VTs a atender as ordens de transporte que surgem durante a evolução dinâmica do SAP, considerando-se a possibilidade de variações de demanda de transporte nas várias estações de trabalho causadas por alterações abruptas no plano de produção, problemas de manutenção, falhas, etc., bem como problemas nos próprios transportadores (manutenção dos veículos, falhas, etc.).

Considerando estes aspectos, este Capítulo apresenta inicialmente uma especificação detalhada do problema de alocação de VTs e uma descrição das principais abordagens relacionadas ao problema do transporte ao nível de supervisão de tarefas. Em seguida, é

proposta uma estrutura de controle reativo capaz de realizar a alocação mais adequada dos VTs de um SAP a partir da interação com operadores humanos. Em relação ao sistema de controle propõe-se uma técnica de mapeamento dos pontos de estacionamento dos VTs onde se realiza um particionamento do sistema produtivo em regiões produtivas. Finalizando, são propostos algoritmos de controle que buscam uma solução ótima de alocação dos VTs em tempo real.

### **5.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE VTs**

A alocação de VTs em tempo real é uma tarefa que possui um grau de complexidade diretamente proporcional à flexibilidade operacional que é atribuída aos próprios VTs. É reconhecido que o sistema de transporte é quem integra fisicamente um SAP sendo, portanto, o arcabouço do fluxo de materiais entre as suas unidades produtivas.

Assim que ocorre uma requisição de transporte, uma das tarefas do sistema de supervisão das tarefas é selecionar qual VT deve ser enviado para atender à requisição. Existem, em princípio, duas filosofias que podem ser adotadas para solucionar este problema:

- Rotas fixas pré-definidas para cada VT ou
- Autonomia na escolha da rota para os VTs .

A primeira abordagem utiliza-se de estratégias de controle que não têm capacidade de reagir a possíveis perturbações<sup>1</sup> que possam afetar o sistema. São situações em que as rotas são determinadas a partir de ferramentas de programação da produção. Em POLITANO et al. [1995] aplica-se regras de produção ‘fuzzy’ para obter a programação de um ‘job-shop’ considerando um sistema de veículos autônomos de transporte para integrar fisicamente o sistema produtivo. Entretanto, estas técnicas de programação não consideram a ocorrência de alterações imprevistas no plano de produção; seja por problemas de alteração de datas de entrega, seja pela ocorrência de falhas nas unidades produtivas; ou ainda por problemas de manutenção nos VTs e outros equipamentos. Outra limitação deste tipo de estratégia é que, com frequência, os VTs trafegam em vazio, buscando itens para serem transportados em sua rota fixa, fato este que deve ser tratado com cuidado para se avaliar o custo destas ocorrências.

Em relação a outra abordagem, trata-se de uma estratégia de controle que permite explorar-se a autonomia existente nos VTs, permitindo inclusive a consideração de procedimentos de detecção, tratamento e recuperação de falhas no sistema. Por exemplo, em JIN et al. [1995] é proposto um controle de tráfego de VTs baseado no método de aprendizagem por exemplos - ID3 (‘Induction of Decision Tree’). A técnica proposta foi aplicada para um estudo de caso de um sistema produtivo modelado por uma estrutura em rede 4x4 de acordo com a Fig. 5.1. As características consideradas para o projeto do sistema de controle foram:

- Estado atual do sistema.

---

<sup>1</sup> Entende-se por perturbação uma interação com o sistema produtivo que causa alterações no comportamento dinâmico do mesmo e que pode conduzi-lo para uma situação não prevista e impossível de ser controlada.

- Taxa de produtividade.
- Turnos de trabalho diários.
- Número de VTs acessando as intersecções.

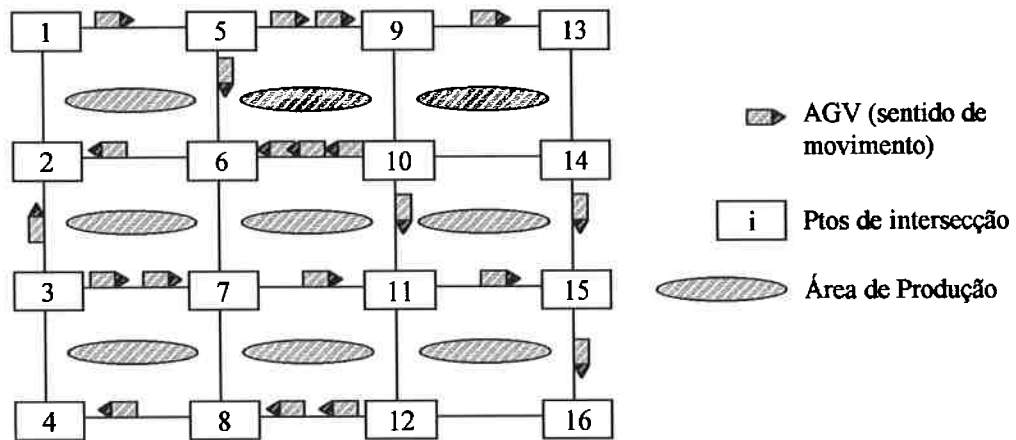


Fig. 5.1 'Layout' da rede 4x4 do estudo de caso (JIN et al. [1995])

O resultado mostrou-se fortemente dependente da árvore de decisão gerada. Para melhorar a acuidade dos resultados verifica-se que é necessário aumentar o grau de complexidade desta árvore, limitando a aplicação desta técnica. Portanto, quanto maior a autonomia do sistema de transporte, maior será a flexibilidade do sistema produtivo mas, em contrapartida, maior será a complexidade do sistema de controle.

Ainda em relação aos sistemas de transporte que possuem autonomia para a escolha de suas rotas, deve-se considerar o fato das estratégias de controle destes sistemas necessitarem de uma especificação mais detalhada e precisa para que soluções que a

princípio pareçam ser “boas”, não propaguem distorções em seu comportamento dinâmico.

Por exemplo, considere a regra de controle com a heurística que consiste em enviar o VT mais próximo à estação de carga/descarga que estiver requisitando transporte. Apesar de a primeira vista parecer uma solução adequada, existem várias situações em que esta regra pode ocasionar outros problemas operacionais que comprometem os índices de desempenho global do sistema. Neste sentido, pode haver uma aglomeração de VTs em determinados trajetos da planta, prejudicando o trânsito e o tempo de atendimento do sistema de transporte em outras regiões distantes destes VTs, causando ainda um desbalanceamento inadequado da distribuição dos VTs no sistema.

### 5.1.1 Graus de Indeterminismo para o Controle de VTs de um SAP

Considerando-se os aspectos levantados, a tarefa de especificar-se formalmente o comportamento dinâmico que deve apresentar um sistema de transporte baseado em VTs que atenda as necessidades de um SAP, possui uma dificuldade intrínseca que advém da própria natureza destes sistemas. São sistemas cuja evolução de estados apresenta dois graus de indeterminismo importantes a serem considerados :

- Indeterminismo em relação ao tempo. Como a dinâmica dos sistemas produtivos aqui retratados são definidos em uma primeira instância como função de regras artificialmente concebidas (pelo homem), mas sujeito à interação com outros sistemas e a própria natureza, o sistema de VTs possui um indeterminismo em relação ao tempo.

- Indeterminismo em relação à seqüência de eventos. Ainda que exista uma seqüência pré-definida de eventos que caracteriza cada um dos processos a serem executados no sistema, não existe necessariamente um sincronismo entre processos que determine previamente um sequenciamento de requisições de transporte.

Este comportamento dinâmico do sistema de transporte é o principal obstáculo para o desenvolvimento de sistemas de controle que gerenciam e otimizam o fluxo de VTs.

Neste contexto, apresenta-se a seguir as considerações fundamentais para otimização do sistema de VTs:

- O sistema de VTs deve apresentar um elevado nível de flexibilidade operacional, garantindo um nível de autonomia suficiente para que independa do sequenciamento fixo das ordens de produção em função do tempo.
- O sistema de VTs deve ser capaz de alocar os transportadores automaticamente segundo uma distribuição homogênea em função da demanda das estações de carga/descarga.
- O sistema de VTs deve ser capaz de eliminar os congestionamentos de veículos no sistema o que poderia ocasionar filas de espera em pontos de intersecção e comprometimento do atendimento da demanda de transporte do sistema global.
- O sistema de VTs deve ser capaz de adaptar-se à ocorrência de eventos imprevistos como falhas nos transportador ou alterações dos níveis de demanda nas estações de carga/descarga.

## 5.2 ABORDAGENS PARA O PROBLEMA DO TRANSPORTE

O objetivo desta seção é apresentar alguns dos principais resultados obtidos com o estudo de alternativas para a solução dos problemas de distribuição e alocação dos VTs em um sistema produtivo. O propósito deste estudo baseia-se em auxiliar a tarefa de propor-se um conjunto de procedimentos adequados para a realização do controle destes VTs em tempo real, considerando o caráter multidisciplinar do problema.

Em NOVAES [1978], BRONSON [1985] e PUCCINI [1987] são apresentadas técnicas tradicionais que podem ser aplicadas para a solução de problemas do transporte. Baseiam-se em programação inteira que utilizam algoritmos de transporte associados à regras como do *canto noroeste* ou *método de Vogel*. Estas abordagens envolvem um procedimento para obtenção de uma solução que consiste em:

- Determinação de uma solução inicial,
- Teste da solução quanto à condição de ótimo e
- Melhoria da solução quando não é ótima até obter-se uma que seja.

As respostas obtidas referem-se a quantos e quais produtos devem ser transportados a um custo mínimo e que atuam no mesmo nível da técnica para resolver os conflitos referentes a qual produto deve ser transportado, apresentado no Capítulo 4. A estratégia de controle baseia-se em selecionar qual a requisição de transporte mais prioritária e que não causará distúrbios no controle do sistema (causar 'deadlock' por exemplo), sendo assim uma solução mais concreta e efetiva que as técnicas baseadas em programação inteira.

O problema de atribuição ou designação consiste em caso especial de problemas de transporte onde cada unidade a ser alocada a partir de uma origem para um determinado destino é considerada individualmente, de maneira que exista igual número de origens e destinos. A formulação clássica do problema implica em existirem  $n_a$  indivíduos,  $m_t$  tarefas e uma estimativa dos custos  $U_{ij}$  com  $(i = 1, \dots, n_a; j = 1, \dots, m_t)$  correspondentes a todas as combinações de indivíduos e tarefas. O objetivo é atribuir tarefas a esses indivíduos de modo que o custo total seja mínimo. As técnicas baseadas nesta abordagem não definem a solução do problema de distribuição dos VTs mas podem auxiliar no processo de alocação destes.

Como o problema de alocação de VTs não se constitui em um simples problema de designação, é necessário desenvolver uma metodologia de projeto do sistema de controle em que após definir-se uma estratégia para a distribuição dos VTs no sistema produtivo seja possível agregar os algoritmos de designação para o controle da alocação destes VTs. Estes detalhes são apresentados na seção 5.5.

Uma outra abordagem considerada para o problema de alocação e controle de VTs é a teoria de 'scheduling' (BAKER [1974], MORTON et al. [1993], LEE; DiCESARE [1994]). Nesta proposta, uma das abordagens clássicas para a solução do problema de programar o sistema de transporte consiste em alocar os recursos (VTs) para executar um conjunto de tarefas baseado em princípios, modelos, técnicas e inferências lógicas que constituem a teoria de 'scheduling'. Esta teoria é predominantemente quantitativa e baseia-se em modelos matemáticos contendo uma função objetivo e um conjunto de restrições que devem ser satisfeitas. Apesar de seu potencial, uma das dificuldades desta



abordagem está na dependência da especificação de custos que em várias situações é difícil de mensurar e até mesmo definir claramente.

Outro aspecto importante que deve ser considerado é o fato de que nos problemas de 'scheduling' existem limitações impostas, ou pela capacidade dos recursos disponíveis, ou pelas restrições tecnológicas. Neste contexto, a solução desta classe de problemas envolve questionamentos a respeito de quais recursos serão alocados para realizar cada uma das tarefas e quando cada tarefa será realizada. Em relação aos recursos que serão alocados, o problema é dinâmico, isto é, em um determinado momento pode existir um decréscimo no número de transportadores ativos por problemas de manutenção ou falha que alteram completamente as condições previstas para a computação de uma determinada programação de tarefas de transporte. O instante associado à realização do transporte é outro fator de indeterminação do sistema conforme levantado anteriormente. Desta forma, impor um controle dos VTs que se baseia exclusivamente no parâmetro tempo é claramente inadequado para o sistema em questão.

Outra formulação considerada consiste na aplicação do conceito de entropia para auxiliar o processo de controle de alocação de VTs (PAPOULIS [1984], HAKEN [1988], BUCK; MACAULAY [1991]). Supondo um experimento  $\mathcal{S}$ , que representa todos os eventos que podem ocorrer num sistema. Considere agora o problema de estimar-se uma medida de incerteza em relação à ocorrência ou não de qualquer evento  $A_i$  de uma partição<sup>2</sup>  $U$  de  $\mathcal{S}$ . A medida da incerteza de  $U$  representada por  $H(U)$  é denominada entropia da partição  $U$ .

---

<sup>2</sup> Uma partição é uma coleção de eventos mutuamente exclusivos tal que a união é igual a  $\mathcal{S}$ .

O objetivo é utilizar a função de medida de entropia para resolver o conflito de qual VT deve ser alocado para atender uma determinada requisição de transporte. Neste contexto tem-se que  $\mathcal{A}$  representa a união dos eventos  $A_i$ , onde  $A_i$  identifica os eventos de atendimento do VT(i) a uma determinada requisição de transporte.

Entretanto, apesar de sua potencialidade para o controle de alocação de VTs, descreve-se a seguir alguns problemas associados a este procedimento:

- Por hipótese, os eventos devem ser mutuamente exclusivos. Este fato torna necessária a condição de avaliar-se cada requisição de transporte isoladamente. Isto dificulta sobremaneira a obtenção de uma “boa” solução uma vez que seria mais adequado considerar-se todas as requisições de transporte em relação a todos os VTs disponíveis a cada instante. Este procedimento evitaria erros causados por uma abordagem que se concentra em obter uma série de “boas” soluções locais, isto é, a cada instante associa-se o VT mais adequado para uma determinada estação que requisita transporte, em detrimento das demais que podem estar no mesmo estado.
- A quantificação da probabilidade de cada VT atender uma determinada demanda envolve a incorporação de heurísticas de difícil especificação para minimizar tempos de transporte e também tempo de espera nas estações requisitantes.

Para finalizar, considera-se a seguir a possibilidade de adaptação de técnicas e metodologias de planejamento de arranjo físico para definição de uma estratégia que gere uma especificação da distribuição ótima dos VTs no sistema produtivo, uma vez que, a

princípio, existe uma forte correlação no aspecto físico/geométrico entre o problema de definir-se uma distribuição de pontos estratégicos para estacionamento dos VTs no chão de fábrica e problemas de 'layout' do sistema produtivo.

A definição do arranjo físico de um sistema produtivo está associada à análise dos processos a serem executados neste sistema e suas facilidades (recursos, infra-estrutura, etc.). Neste aspecto, o objetivo é quantificar a interação que existe entre as várias estações de trabalho, considerando um determinado horizonte de demanda em termos de processos a serem executados no sistema. Uma vez medida a interação entre as várias estações, o arranjo físico é determinado de tal forma que as estações estejam distribuídas adequadamente para garantir uma maior proximidade física (ou vizinhança) no chão de fábrica quanto maior for a interação lógica entre as estações de trabalho e de acordo com os processos produtivos que as integram (CHWIF [1994], GROOVER [1987], NOVAES [1978]).

Normalmente, a situação correspondente à alocação e distribuição de VTs aplica-se a um ambiente em que o arranjo físico do sistema produtivo já existe. Portanto, o problema pode ser abstraído para a situação em que se pretende distribuir os VTs para que atendam a uma determinada demanda de transporte. Entretanto, é fundamental considerar-se o aspecto "tempo real" para que a aplicação destas técnicas não restrinja a flexibilidade do sistema de transporte pois, neste caso, as rotas seriam predeterminadas de acordo com o fluxo de materiais e respectivo seqüenciamento de operações de cada processo. Este assunto será retomado na seção 5.5 onde se discute em detalhes os problemas de aplicar-se técnicas de planejamento de arranjo físico para determinar os pontos estratégicos de estacionamento dos VTs.

Apesar das abordagens citadas nesta seção não esgotarem a discussão sobre adaptações de técnicas existentes para o controle de alocação de VTs, o estudo destas propostas indica que não são suficientes para solucionar por completo os problemas em discussão. Assim, considera-se aqui uma nova arquitetura para o controle do sistema capaz de transladar o referencial do problema de alocação de VTs para o próprio VT, isto é, considera-se que não são somente os processos que devem observar os VTs, mas também os VTs é que devem observar os processos e reagir de acordo com o comportamento dinâmico do sistema global (de fato, este é o procedimento antropocêntrico identificado na prática). Neste contexto, a técnica de controle a ser adotada deve comportar o grau de indeterminação quanto à atribuição dos VTs às requisições de transporte, inerente ao comportamento do sistema.

### **5.3 SISTEMAS REATIVOS**

Entende-se por sistema reativo uma classe de sistemas que apresenta como peculiaridade em seu comportamento o fato de haver uma permanente interação entre o sistema e o ambiente, sendo que as interações ocorrem arbitrariamente durante a evolução dinâmica do próprio sistema em si.

O conceito de sistema reativo é amplamente aplicado na área de planejamento - 'planning' - com o objetivo de conciliar as tarefas de buscar uma solução para atingir-se determinado objetivo - 'goal' - e viabilizar a execução deste plano. Desta forma há um entrelaçamento das atividades de planejamento e execução do plano (SILVA; SHIMADA [1995], PRADO et al. [1993] e GEORGEFF; LANSKY [1990]).

De acordo com BERRY; GONTHIER [1992] apud GOMES [1997] um sistema reativo complexo caracteriza-se por ser constituído por três partes:

- Uma interface com o ambiente responsável basicamente pelo fluxo de informações para aquisição de dados de entrada e pelo fluxo de ações correspondentes às atuações de saída.
- Um ou mais núcleos reativos capazes de identificarem a ocorrência de eventos de entrada a partir da detecção de sinais e computarem as saídas como reação.
- Tratamento de dados pertinentes à tarefas transformacionais, incluindo representação e validação de restrições associados ao tempo, para a realização do controle nos núcleos transformacionais.

De acordo com RICH & KNIGHT[1994] um sistema reativo precisa ter acesso a uma base de conhecimentos que descreva quais ações devem ser tomadas mediante determinadas condições. Entretanto, este sistema difere dos demais porque o processo de seleção de quais ações devem ser executadas retorna como solução um conjunto unitário e não uma seqüência de ações. Isto significa que o objetivo de um sistema reativo é simplesmente reagir diante de uma situação observável.

Outro fato importante destacado por RICH & KNIGHT[1994] é que uma das grandes virtudes de sistemas reativos é que operam robustamente em domínios onde uma modelagem completa e precisa é difícil. Acrescente-se ainda o fato de que estes sistemas são de resposta extremamente rápida uma vez que evitam a explosão combinatória de

manipulação de dados quando se analisa de uma só vez uma seqüência de ações a serem executadas em um determinado horizonte de tempo.

### **5.3.1 SAPs como Sistemas Reativos**

Foi observado no item 5.1.1 o fato de existirem graus de indeterminismo no comportamento dinâmico do sistema de transporte baseado em VTs, dificultam o controle de SAPs reativos. Uma possível interpretação para auxiliar a solução do problema é considerar que os graus de indeterminismo são causados em parte pela interação que existe entre o sistema e o ambiente que o envolve, ambiente este do qual o elemento humano faz parte.

Especificar um modelo adequado para o ambiente e sua interação com o sistema é uma tarefa demasiadamente utópica, pois seria necessário descrever formalmente o comportamento dinâmico do ambiente interagindo com o SAP a um nível de detalhamento suficiente para realizar-se o controle em tempo real. Desta maneira, haveria o risco de expandir-se indefinidamente a dimensão da tarefa de especificação de um modelo capaz de representar a dinâmica do sistema global e permitir a realização do controle.

De acordo com o conceito de sistema reativo, o SAP deve possuir a capacidade de reagir quando houver necessidade. Assim, esta abordagem implica em obter resultados que significam a ativação de uma ação que deve ser executada para a solução imediata do problema ocorrido, exigindo o desenvolvimento e aplicação de técnicas de controle

capazes de reagirem à ocorrências relacionadas às variações das condições do ambiente e do próprio sistema em si.

Se for considerada a hipótese de flutuação nos níveis de demanda em cada uma das estações, esta variação pode ser atribuída a uma interação do sistema produtivo e o ambiente em que está envolvido. Analogamente, uma variação no número de VTs capazes de realizarem o transporte (problemas de manutenção, situações de emergência, etc.). E eventos do tipo, falha de uma máquina, manutenção de uma máquina, alterações repentinas no programa de produção, etc. podem também ser interpretadas como interações do sistema com o ambiente. Intrinsecamente, uma vez que os eventos citados afetam diretamente o problema de alocação de VTs, o objetivo é prover a reatividade neste sentido para o controle do sistema de transporte.

O controle de um sistema desta natureza é realizado através da interação da parte reativa com a parte produtiva de maneira que ambas encontram-se concatenadas no sistema como um todo, sendo necessário, portanto, controlar a dinâmica deste sistema global. A Fig. 5.2 ilustra um diagrama esquemático das partes fundamentais de um SAP em que se destaca a integração do operador como elemento de supervisão capaz de disparar a reatividade do sistema.

É importante observar que neste trabalho o conceito de reatividade é aplicado para o sistema de transporte baseado em VTs que realiza o fluxo de materiais em SAPs. Portanto, não constitui-se no caso genérico do sistema produtivo global. Nestas condições, será assumida a hipótese de que os VTs não dependem necessariamente da definição de rotas fixas pré-programadas, isto é, trata-se de um sistema de transporte autônomo de elevada flexibilidade operacional.

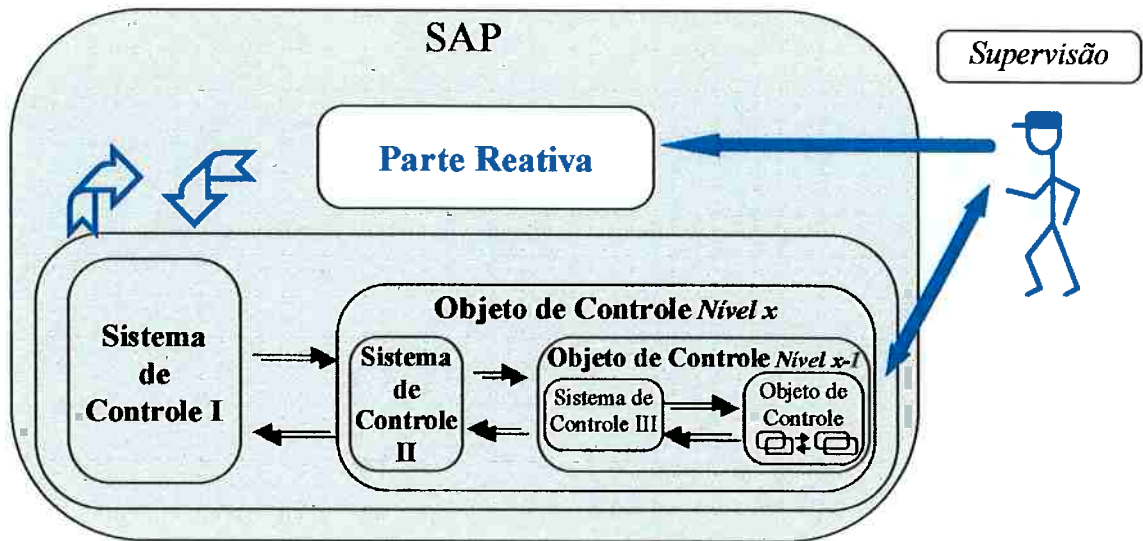


Fig 5.2 Arquitetura de um sistema reativo para o caso de SAPs

Uma vez definida a arquitetura de um SAP, para a solução do problema de alocação e distribuição de VTs nesta classe de sistemas desenvolve-se um procedimento que consiste nas seguintes etapas:

- Definição de um ponto estratégico representativo de toda a demanda de transporte do sistema para ser utilizado como referência no procedimento.
- Particionamento do sistema produtivo em regiões de maneira que a cada região aloca-se um VT.
- Determinação de pontos de estacionamento temporário dos VTs.
- Especificação de algoritmos de controle para a manutenção da distribuição dos VTs e alocação dos mesmos de acordo com as demandas de transporte de cada estação de carga/descarga que compõem o sistema produtivo.



#### 5.4 MAPEAMENTO DOS PONTOS DE ESTACIONAMENTO DOS VTs

O problema de mapear-se os pontos de referência para o estacionamento temporário dos VTs pode ser resolvido por simulação. O procedimento consiste em realizar-se uma série de testes de simulação para diferentes arranjos físicos e se avaliar o desempenho do SAP para cada uma das situações. Uma solução adequada implica em cumprir-se o tempo de atendimento em todas as estações que requisitam transporte para maximizar o índice de produtividade do sistema e ater-se ao critério de mínima distância percorrida para minimizar os custos de transporte. Ferramentas computacionais como ProModel e Arena são adequadas para a realização destas tarefas (BAIRD; LEAVY [1994], BANKS [1995]). Estes procedimentos de análise por simulação representam uma alternativa interessante quando uma solução do tipo ‘hard’ é adequada para o problema.

Se for necessário estabelecer reatividade na definição dos pontos estratégicos de estacionamento, para que o sistema se adapte às variações das condições e do comportamento do próprio sistema, esta postura não é mais uma alternativa adequada para a resolução do problema. É necessário estabelecer um critério para gerar-se estes pontos estratégicos em tempo real, de maneira que o sistema de controle se adapte continuamente às condições e à dinâmica do sistema a cada instante.

É importante observar que os pontos estratégicos devem ser atualizados com uma frequência que depende da dinâmica do sistema produtivo. Uma análise superficial deste fato induz ao equívoco de que a atualização só é necessária quando há falhas em algum dispositivo do sistema. Entretanto, sempre que for alterado o programa de produção, ou as condições dos recursos, seja pela ocorrência de falhas ou não, é necessário redefinir os pontos estratégicos de estacionamento do sistema de transporte. Supondo um sistema de

elevada flexibilidade operacional que comporta a manufatura simultânea de um conjunto de vários produtos de lotes variáveis, à medida em que os lotes são finalizados, deve-se atualizar o posicionamento dos pontos estratégicos. Uma vez que o operador poderá intervir na dinâmica do sistema disparando a reatividade do mesmo, em sistema usuais é ele quem avaliará o momento exato para executá-lo.

Portanto, quanto maior a flexibilidade operacional de um SAP e quanto maior a sua produtividade, maior é a importância de atualização dos pontos estratégicos de estacionamento dos VTs. Esta é uma premissa básica que deve ser atendida quando o objetivo é controlar um sistema de transporte de elevada flexibilidade operacional baseado em VTs.

#### **5.4.1 Aplicação de Técnicas de Planejamento de Arranjo Físico**

A abstração de que os pontos estratégicos de estacionamento na planta de um SAP correspondem a atividades que realizam operações de transporte é um artifício efetivo para aplicação de técnicas de planejamento de arranjo físico na solução do problema em questão.

De acordo com MUTHER[1978] apud CHWIF[1994] há duas classes de critérios básicos que podem ser aplicados para posicionar as atividades em um arranjo físico:

- Critérios de avaliação da intensidade de fluxo entre as atividades. Fornece resultados quantitativos podendo envolver fatores do tipo volume, forma, peso e custos de movimentação.

- Critérios de medida de prioridade de proximidade - 'closeness ratings'.  
Permite o estabelecimento de uma hierarquia de relacionamento entre as atividades. Uma vez que predomina o caráter subjetivo, é comum aplicar-se a teoria 'fuzzy' para desenvolvimento de métodos baseados nesta classe de critérios.

Em relação às medidas de intensidade de fluxo, a maioria das formulações utiliza como função objetivo uma função de custo total do arranjo para ser minimizada. Considerando-se  $n$  atividades de transporte entre as várias estações de carga/descarga e os pontos de estacionamento, o custo total do arranjo pode ser avaliado pela expressão 5.1.

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot k_{ij} \cdot \lambda_{ij} + \sum_{i=1}^n c_i \quad (5.1)$$

Onde :

$w_{ij}$  é uma medida de interação entre as atividades  $i$  e  $j$  ;

$\lambda_{ij}$  é uma medida de distância entre as atividades  $i$  e  $j$ ;

$k_{ij}$  é o fator de conversão para os custos entre as atividades  $i$  e  $j$ ;

$c_i$  é o custo fixo de cada atividade.

Entretanto, este critério aplicado isoladamente não é suficiente para satisfazer as condições de otimização de vários casos de arranjo físico. Há sistemas de auxílio ao

planejamento de arranjos físicos (CAL - 'Computer Aided Layout') que pretendem otimizar múltiplos objetivos baseados em sistemas especialistas, mas sua aplicabilidade ainda é discreta em virtude das limitações em termos de alternativas que é capaz de manipular (BANERJEE et al. [1992]).

Considerando-se o fato de que as atividades que são realizadas em um sistema produtivo são alocadas em pontos interconectados e não independentes, a formulação para o problema é do tipo QAP ('Quadratic Assignment Problem') de acordo com LIGGET [1981] e SHIH et al. [1992], e como os problemas deste tipo são classificados como NP-completo, o tempo de processamento torna-se um fator limitante (SAHNI; GONZALES [1976] apud CHWIF [1994]). Para otimizar estas formulações é necessário recorrer-se a técnicas de busca em árvore (SHIH [1991]), ou métodos heurísticos (DAS [1993]), ou métodos baseados na teoria de grafos (GOETSCHALCHX [1992]) ou ainda métodos hierárquicos baseados em '*Cluster-analysis*' (TAM; LI [1991]).

Para o caso específico em que se pretende adaptar estas técnicas para determinar os pontos estratégicos de estacionamento dos VTs tem-se uma complicação adicional: a descrição dos relacionamentos entre as várias atividades resulta em uma rede de conexões em que a cada ponto estratégico estarão potencialmente conectadas todas as estações de carga/descarga. Esta modelagem causará um conflito uma vez que os eventos correspondentes à ocorrência de atendimentos a requisições de transporte são mutuamente exclusivos. Além disso, existem dificuldades em considerar-se o critério de que os tempos de atendimento nas diversas estações de carga/descarga devem ser satisfeitos, uma vez que este critério está associado a problemas de '*schedulling*' e não de '*layout*'.

Conclui-se, portanto, que as técnicas de 'layout' não são aplicáveis diretamente para o problema de definição dos pontos estratégicos de estacionamento, principalmente quando se considera a necessidade de execução em tempo real para garantir o controle adequado de alocação dos VTs. Entretanto, a análise criteriosa desta possibilidade é fundamental para o desenvolvimento das técnicas de controle de alocação de VTs.

#### **5.4.2 Centróide Virtual de Demanda Global de Transporte (CVDG)**

Inicialmente, considera-se um SAP constituído por  $N$  estações de carga/descarga, integrado por um sistema de transporte que possui um único VT. Nestas condições, o objetivo é determinar qual o ponto estratégico que representa adequadamente o ponto de estacionamento deste VT.

Em princípio, este ponto deve estar localizado de tal maneira que o VT esteja posicionado o mais próximo possível das estações que requerem transporte com maior frequência. Utilizando-se esta estratégia, existe maior probabilidade de evitar-se atrasos relacionados ao tempo de atendimento de uma requisição de transporte, uma vez que, quanto maior a demanda de transporte em uma estação, maior sua taxa de utilização e, portanto, menor o intervalo de tempo disponível até que nova requisição seja solicitada. Nestes termos, estes pontos que atendem elevadas taxas de utilização são singulares, propensos a originarem gargalos provocados pela ineficiência do sistema de transporte.

A seguir apresenta-se a equação 5.2 como uma proposta para realizar-se o cálculo das coordenadas deste ponto que passa a ser denominado por  $E_G$ .

$$E_G = O + \sum_{i=1}^N \left( \frac{D_{mi}}{\sum_{j=1}^N D_{mj}} \right) \cdot (P_i - O) \quad (5.2)$$

Onde:

$N$  é o nº de estações de carga/ descarga

$O$  é a origem do sistema do plano  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ ;

$E_G$  é a posição do estacionamento do VT em  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ ;

$D_{mi}$  é a taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação  $E_i$ ;

$P_i$  é a posição da estação de carga  $E_i$  em  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$  no sistema.

Em uma primeira instância, a relação 5.2 representa uma média ponderada das distâncias  $\overline{OP_i}$ . Para analisar-se criteriosamente a semântica desta expressão, serão apresentados outros dois modelos para este sistema que auxiliarão a esclarecer as propriedades contidas na expressão 5.2.

Em primeiro lugar, será aplicada a abordagem que consiste em associar-se o conceito de “vazão de material” em cada ponto que representa a localização de uma estação de carga/descarga. O conceito de “vazão de material” é interpretado como a taxa média de requisição de transporte de produtos.

De acordo com 5.2, a cada uma das estações de carga/descarga  $E_i$  associa-se uma demanda média por transporte denominada  $D_{mi}$  (número médio de requisições de transporte por unidade de tempo).

Considerando-se a hipótese de que cada uma das estações de carga/descarga  $E_i$  pode ser mapeada no chão de fábrica por um ponto  $P_i$  e que a “massa equivalente” destes pontos é representada pela demanda média por transporte  $D_{mi}$ ; uma vez que para cada requisição há um item a ser transportado e portanto há uma vazão de material para ser computada; é possível estimar-se um ponto estratégico que represente a vazão equivalente do sistema global.

Portanto, a utilidade deste ponto está em identificar a posição geométrica do local que representa o que pode ser denominado de ‘*centróide virtual de demanda global de transporte*’. Desta forma, se o ponto de estacionamento do VT for neste local, com certeza estará mais próximo das estações que realizam o maior número de transportes por unidade de tempo. Além disso, amplifica-se o potencial do VT de atender adequadamente as requisições de transporte já que estará mais próximo de quem mais produz.

Baseado no que foi exposto, estabelecer-se-á uma analogia entre “massa” e “vazão de material” para desenvolver uma estratégia de controle de alocação de VTs.

A Fig. 5.3 representa o modelo de um sistema constituído por  $N$  pontos materiais  $P_i$  com “massas”  $m_i$ .

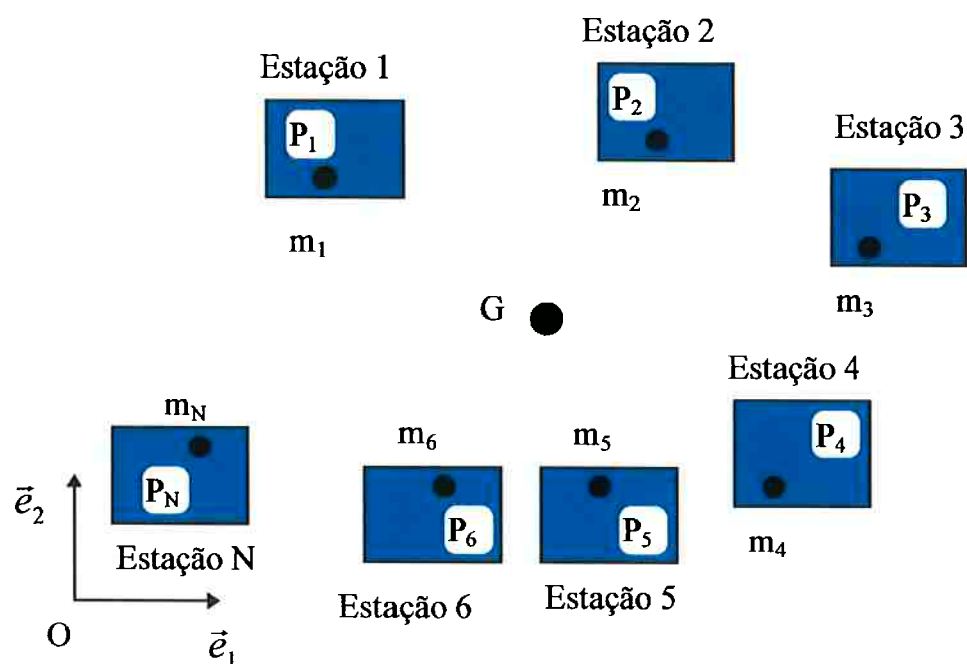


Fig. 5.3 Modelo do sistema produtivo para cálculo do “centro de massa”

De acordo com KITTEL [1980] o centro de massa  $G$  do sistema mostrado na Fig. 5.3 é calculado a partir da expressão 5.3.

$$(x_G, y_G) = \frac{(\sum_{i=1}^N m_i \cdot x_i, \sum_{i=1}^N m_i \cdot y_i)}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (5.3)$$

Onde:

$$(x_G, y_G) = G;$$

$m_i$  é a massa do ponto  $i$ ;

$$(x_i, y_i) = P_i .$$



Retomando-se a equação 5.2, e considerando a hipótese de que o ponto  $O$  corresponde à origem do sistema cartesiano  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$  tem-se a equação 5.4.

$$E_G = \sum_{i=1}^N \left( \frac{D_{mi}}{\sum_{j=1}^N D_{mj}} \right) \cdot (P_i) = \left( \frac{\sum_{i=1}^N D_{mi} \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N D_{mi}}, \frac{\sum_{i=1}^N D_{mi} \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N D_{mi}} \right) \quad (5.4)$$

Onde:

$$P_i = (x_i, y_i)$$

$$E_G = (x_{E_G}, y_{E_G})$$

Aplicando-se o critério de identidade de polinômios nas expressões 5.3 e 5.4 conclui-se que:

- $m_i = D_{mi} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$ , considerando-se um intervalo fixo de tempo para  $D_{mi}$ ;
- $G = E_G$  em  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ .

Portanto, verifica-se que, na expressão 5.2,  $E_G$  é um ponto estratégico que reflete as propriedades do centro de massa de um sistema. Neste contexto, faz-se necessário esclarecer quais são as implicações deste resultado.

Considerando-se um sistema de partículas representadas por pontos materiais, por definição, centro de massa é um ponto virtual que se desloca da mesma maneira que se deslocaria uma única partícula, sujeita ao mesmo sistema de forças externas mesmo quando os pontos rodam ou vibram enquanto se deslocam (RESNICK; HALLIDAY

[1981]). Existe uma série de propriedades físicas inerentes a este ponto, entretanto, serão destacadas apenas aquelas que forem relevantes para o escopo deste trabalho. Portanto, de acordo com RESNICK; HALLIDAY [1981] têm-se:

- I. A posição do centro de massa independe do sistema de referência utilizado para localizá-lo.
- II. O centro de massa de um sistema de partículas depende apenas das massas das partículas e de suas posições umas em relação às outras.
- III. É um ponto que sofre interações com a resultante das forças externas mas que não é afetado por forças internas.

Considerando-se a classe de sistemas produtivos, existe necessidade de abstrair-se estas propriedades. Portanto, o sistema produtivo deve ser interpretado considerando-se cada uma das estações de carga/descarga que transportam material como se fossem pontos materiais em que a “massa” é representada pela “média da quantidade de material transportado”. Não existe uma preocupação com o fato de ocorrer ou não variação de massa com o tempo, pois o objetivo não é este. Será assumida a hipótese de que em média a “massa” de cada um destes pontos é proporcional a  $D_{mi}$  e que o movimento destes pontos é causado pela ação de VTs.

A afirmação (I) pode ser aplicada diretamente para os SAPs e garante a invariabilidade dos resultados que envolvem o cálculo do “centro de massa” permitindo maior flexibilidade quanto à avaliação dos parâmetros do sistema para a tomada de decisões para a realização do controle de alocação dos VTs.

Em relação à propriedade (II), conjuga-se com o objetivo de buscar-se uma técnica que relacione a distância a ser percorrida “(posição)” e a demanda por transporte “(massa)” em cada estação “(ponto)”. Verifica-se desta forma que este equacionamento é concordante com abordagens baseadas no dimensionamento de funções objetivo que avaliam o custo de transporte baseado na distância percorrida e no volume a ser transportado. (LI et al. [1995], LEE; DiCESARE [1995]; POLITANO et al. [1995]; DYNNIKOV et al. [1997])

Em relação a propriedade (III) existem dois aspectos importantes. Em primeiro lugar reforça a adequabilidade da proposta de uma estrutura de sistema reativo que interage com o meio externo (ambiente) e da analogia entre forças externas e estas interações. Em segundo lugar, fornece suporte para a realização de outra abordagem para complementar a discussão a respeito da expressão 5.2. Considere um modelo de pontos materiais  $P_i$  onde ocorre uma interação de forças entre estes pontos e um determinado ponto  $G$ . Para simplificar o modelo, suponha que todos os pontos são coplanares. Considere também a hipótese de que a natureza destas forças é do tipo restauradora linear<sup>3</sup> (KITTEL [1980]), de acordo com a expressão 5.3.

$$\vec{F} = -K \cdot \vec{r} \quad (5.3)$$

Onde:

$K$  é a constante de elasticidade;

$\vec{r}$  é o deslocamento medido a partir de um ponto fixo.

---

<sup>3</sup> Entende-se por força restauradora linear uma força que é diretamente proporcional ao deslocamento, medido a partir de um ponto fixo, e aplicada na direção que tende a se opor a este deslocamento.

Estas são as forças elásticas primeiramente estudadas por Robert Hooke em 1678. Neste contexto, a Fig. 5.4 mostra o modelo de pontos materiais proposto.

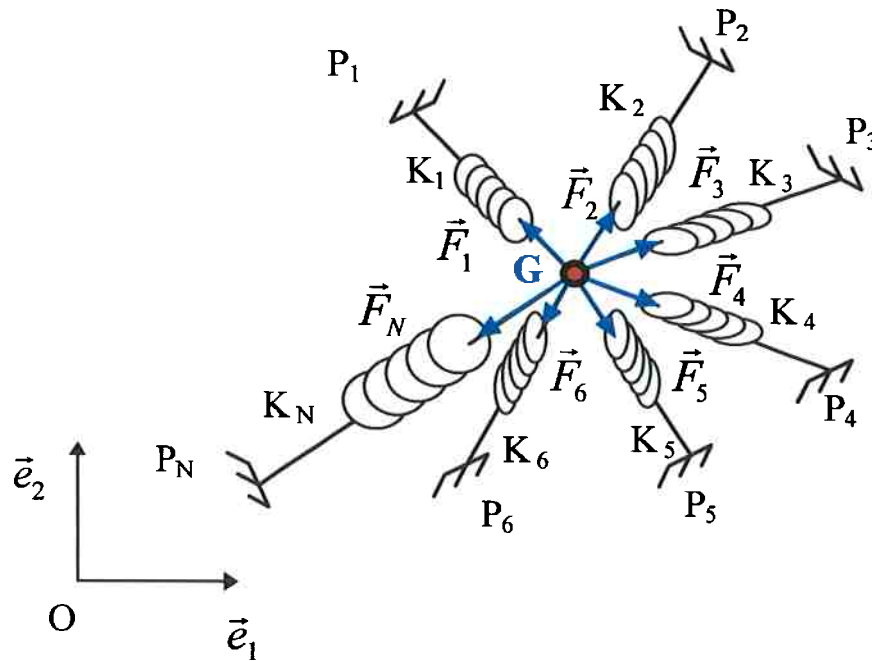


Fig. 5.4 Modelo de forças elásticas.

Calculando-se a resultante das forças  $\vec{R}_G$  no ponto G, tem-se a equação 5.4.

$$\vec{R}_G = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_N \quad (5.4)$$

Decompondo-se as forças segundo os eixos ortogonais do sistema  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$  tem-se a expressão 5.5.

$$\vec{R}_G = R_x \cdot \vec{e}_1 + R_y \cdot \vec{e}_2 \quad (5.5)$$

Onde:

$$\begin{aligned} R_x &= -(\mathbf{K}_1 \cdot (x_1 - x_G) + \mathbf{K}_2 \cdot (x_2 - x_G) + \mathbf{K}_3 \cdot (x_3 - x_G) + \dots + \mathbf{K}_N \cdot (x_N - x_G)) = \\ &= -(\mathbf{K}_1 \cdot x_1 + \mathbf{K}_2 \cdot x_2 + \mathbf{K}_3 \cdot x_3 + \dots + \mathbf{K}_N \cdot x_N) + x_G \cdot (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 + \dots + \mathbf{K}_N) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_y &= -(\mathbf{K}_1 \cdot (y_1 - y_G) + \mathbf{K}_2 \cdot (y_2 - y_G) + \mathbf{K}_3 \cdot (y_3 - y_G) + \dots + \mathbf{K}_N \cdot (y_N - y_G)) = \\ &= -(\mathbf{K}_1 \cdot y_1 + \mathbf{K}_2 \cdot y_2 + \mathbf{K}_3 \cdot y_3 + \dots + \mathbf{K}_N \cdot y_N) + y_G \cdot (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 + \dots + \mathbf{K}_N) \end{aligned}$$

Onde,

$$(x_i, y_i) = P_i \text{ em } (O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$$

$K_i$  é a constante elástica da força  $\vec{F}_i$  entre os pontos  $G$  e  $P_i$ .

Assumindo-se a hipótese de que o ponto  $G$  é um ponto de equilíbrio de mínima energia do sistema, tem-se que a resultante das forças neste ponto é nula. Impondo-se esta condição na equação 5.5 tem-se as coordenadas para o ponto  $G$  de acordo com a equações 5.6a e 5.6b.

$$x_G = \frac{(\mathbf{K}_1 \cdot x_1 + \mathbf{K}_2 \cdot x_2 + \mathbf{K}_3 \cdot x_3 + \dots + \mathbf{K}_N \cdot x_N)}{(\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 + \dots + \mathbf{K}_N)} \quad (5.6a)$$

$$y_G = \frac{(\mathbf{K}_1 \cdot y_1 + \mathbf{K}_2 \cdot y_2 + \mathbf{K}_3 \cdot y_3 + \dots + \mathbf{K}_N \cdot y_N)}{(\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 + \dots + \mathbf{K}_N)} \quad (5.6b)$$

Retornando-se à expressão (5.4) e comparando-a com as expressões (5.6a) e (5.6b) verifica-se, por identidade de polinômios, que:

- $K_i = D_{mi} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$ , considerando-se um intervalo de tempo fixo para  $D_{mi}$ ;
- $G = E_G$  em  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$ .

Portanto, a partir desta analogia verifica-se que o ponto  $E_G$  também é um ponto de equilíbrio de mínima energia do sistema, considerando-se que cada uma das estações de carga/descarga “*atraem*” o VT com uma determinada intensidade proporcional à demanda de transporte  $D_{mi}$ .

A partir da análise destes modelos verifica-se que a expressão 5.2 apresenta as propriedades necessárias para que  $E_G$  seja denominado *centróide virtual de demanda global de transporte*, ou, abreviadamente, CVDG que representa uma solução concreta para o problema de se definir um ponto estratégico ótimo (mínima energia) para o estacionamento de um VT.

#### 5.4.3 Centróides Virtuais de Demanda Regional de Transporte (CVDR)

Prosseguindo-se a análise do problema de estacionamento de VTs, uma extensão natural do CVDG tratado no item anterior consiste em considerar-se a situação em que existe um número genérico  $M$  de VTs que integram um SAP. Desta forma, o enfoque concentra-se na determinação dos pontos estratégicos de estacionamento destes VTs.

A solução obtida para a determinação do CVDG mostra-se adequada quando existe apenas um VT assistindo o transporte de um SAP. Ao calcular-se o CVDG a técnica aplicada converge toda a demanda de transporte para um único ponto a fim de

determinar o local de estacionamento ótimo. Entretanto, uma vez que há  $M$  unidades de VTs para transitarem pelo sistema, é necessário definir-se uma técnica capaz de alocar estrategicamente pontos de estacionamento para estes VTs de acordo com a demanda de transporte nas várias estações de carga/descarga do SAP.

Para resolver este problema é introduzido um procedimento que, em síntese, busca particionar o SAP em regiões produtivas de maneira que a cada região associa-se um VT. Entretanto, o problema de delinear-se as regiões de um sistema produtivo adequadamente é uma tarefa não trivial que envolve uma série de intercorrências, conforme é descrito a seguir:

- Dificuldade em estabelecer-se um procedimento para definir uma região em função da demanda de transporte sendo que esta demanda depende do estado de processos e de recursos que estão sempre variando.
- Não é suficiente estabelecer-se um valor médio de demanda regional  $D_{MR}$ , conforme sugere a expressão 5.7; e utilizar-se este critério como diretriz básica para a partição do sistema em regiões, porque faz-se necessário considerar não só a requisição de transporte mas também o trabalho que será realizado para executar a requisição, já que não existe apenas um VT no sistema.

$$D_{MR} = \frac{\sum_{j=1}^T D_{m_j}}{T} \quad (5.7)$$

Onde:

$T$  corresponde ao número total de estações destino associadas ao fluxo de materiais computadas no sistemas.

- Esta partição evidente não deve ser planar em que se centraliza todo problema de fluxo de materiais para ser tratado globalmente. Incurrer-se neste tipo de abordagem pode elevar sobremaneira o nível de complexidade do problema e comprometer a solução do mesmo.

Considerando-se estes aspectos, o procedimento desenvolvido para definição de regiões produtivas baseia-se no conceito de reatividade, isto é, alterando-se as condições que influenciam a definição das regiões, novas especificações são geradas automaticamente.

Em relação ao problema de quantificar as requisições de transporte e o trabalho associado à execução de cada requisição, aplica-se a expressão 5.8 baseada na proposta de MUTHER; HAGANAS [1969], que foi desenvolvido para casos onde o objetivo é analisar problemas de manipulação e transporte de materiais.

$$ITT_i = \sum_{j=1}^{M_i} D_{mj} \cdot d_{ij} \quad (5.8)$$

Onde:

$i = 1, 2, \dots, N$  ; onde  $N$  é o nº de estações de carga/descarga.

$ITT_i$  é o índice de trabalho de transporte na Estação  $E_i$

$M_i$  é número de estações destino  $E_j$ .

$D_{mj}$  é a taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação  $E_i$ ; dos produtos a serem enviados para a estação  $E_j$ .



$d_{ij}$  é a distância entre as estações  $E_i$  (origem) e  $E_j$  (destino).

Quanto a abordagem planar, a solução consiste em distribuir-se o controle do fluxo de materiais em níveis de hierarquia. O objetivo é abordar-se o problema de acordo com a estrutura proposta anteriormente na Fig. 5.2 com a ressalva de que a parte reativa deve ser distribuída em todos os subníveis de controle, de acordo com a Fig. 5.5.

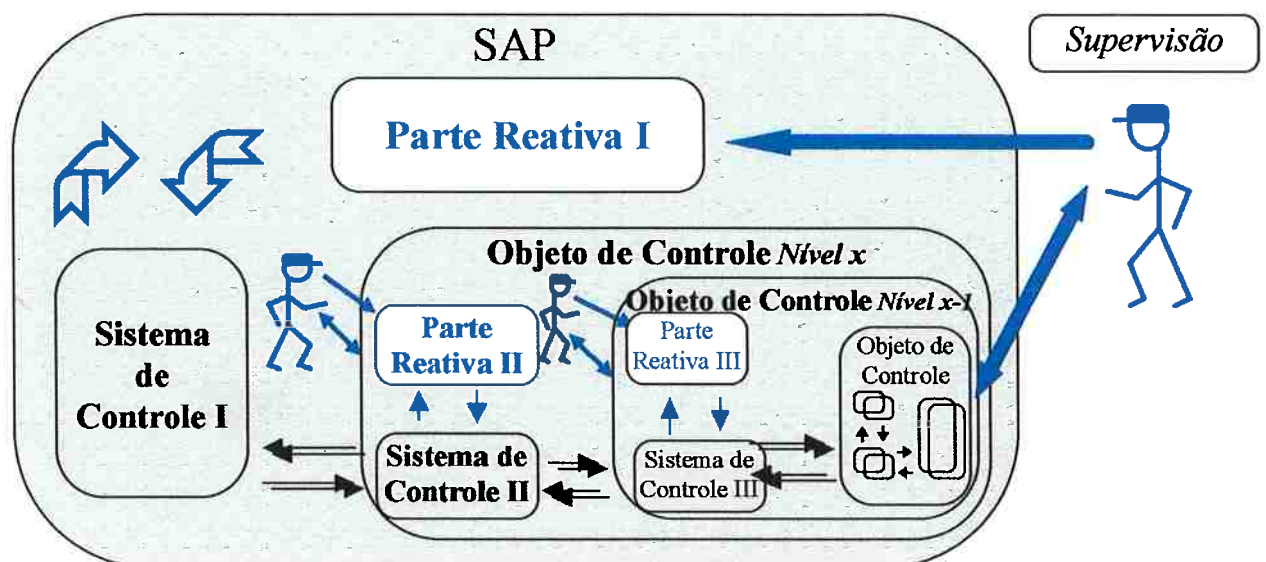


Fig. 5.5 Arquitetura de controle distribuída em vários níveis incluindo a parte reativa

O objetivo de considerar-se a arquitetura da Fig. 5.5 é de permitir uma definição das regiões que atendem às necessidades de transporte presentes em um determinado nível de integração e controle de processos, isto é, a nível de transporte de materiais entre máquinas de uma célula de manufatura, a nível de transporte entre células de manufatura, e assim por diante. Desta forma, minimiza-se o problema de análise de adequabilidade de

trânsito entre as estações  $X$  e  $Y$  a partir de um determinado VT. A complexidade deste problema é maior a partir do momento em que se funde níveis diferentes de controle de fluxos de materiais. Neste contexto, o objetivo é controlar-se a alocação de VTs de forma distribuída conforme é realizado o controle dos processos produtivos, permitindo uma interação explícita com o ambiente e com os operadores em todos os níveis de controle.

Baseado nestas premissas, o procedimento proposto para a partição do SAP em  $M$  regiões assistidos por  $M$  VTs baseia-se nos seguintes critérios:

- A definição das regiões deve ser tal que garanta uma homogeneidade quanto aos índices de demanda de transporte e de trabalho para atender estas demandas.
- O sistema deve ser reativo, isto é, deve redefinir as regiões a partir do momento em que ocorra uma variação das demandas médias de transporte  $D_{mi}$  nas estações de carga/descarga ou então uma variação no número de transportadores capazes de realizarem o transporte de materiais no sistema.
- Cada região deve possuir um ponto de estacionamento estratégico para ser utilizado pelo VT que a esteja assistindo.
- O sistema também deve ser reativo à nível de redefinição da posição estratégica do ponto de estacionamento em uma determinada região, assim que ocorra uma variação das demandas médias de transporte  $D_{mi}$  nas estações de carga/descarga do sistema.

Quanto às hipóteses assumidas para o desenvolvimento do procedimento para a partição do SAP em regiões estratégicas têm-se:

- Não existe distinção em relação a qual VT deve ser alocado para cada região. Todos os VTs são considerados operacionalmente equivalentes.
- O critério deve ser único para delinear-se uma região: manutenção dos índices regionais de demanda e do trabalho de transporte equalizados.
- A possibilidade de existir fluxo de transporte entre regiões não deve influenciar os critérios que definem os limites de cada região. A veracidade desta informação é enfatizada se for considerado o fato de que existe uma distribuição do controle dos fluxos e portanto, a afinidade em termos de recursos e posicionamento de equipamentos entre atividades de um mesmo nível deve ser adequada<sup>4</sup>.

Portanto, cabe agora elucidar o conjunto de procedimentos que é aqui proposto para definir as regiões produtivas de um sistema.

- A) Primeiramente, determina-se o CVDG do sistema global, de acordo com a expressão 5.2.
- B) Estima-se o volume de trabalho médio de transporte por região ( $ITT_{MR}$ ) de acordo com a expressão 5.9, derivada da expressão 5.8.

---

<sup>4</sup> Assumir-se-á a hipótese de que houve um planejamento do arranjo físico do sistema produtivo para minimizar as distâncias de transporte entre as estações de carga/descarga.

$$ITT_{MR} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{N_k} D_{mj} \cdot (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \right) \right)}{N} \quad (5.9)$$

Onde:

$N$  é o número de Estações  $E_i$  do sistema produtivo

$N_i$  é número de Estações destino  $E_j$  alcançadas a partir de  $E_i$ .

$D_{mj}$  é a taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação  $E_i$  de produtos a serem enviados para a estação  $E_j$ .

$(|x_i - x_j| + |y_i - y_j|)$  é a distância entre as estações  $E_i$  (origem) e  $E_j$  (destino).

C) Translada-se o sistema de referência  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$  para o sistema  $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$ , de acordo com a expressão 5.10.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{CG} \\ y_{CG} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Onde:

$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$  são as coordenadas do ponto em  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ .

$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$  é a matriz de mudança da base  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$  para base

$(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$  com determinante não nulo.

$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$  são as coordenadas do ponto em  $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$ .

$\begin{bmatrix} x_{CG} \\ y_{CG} \end{bmatrix}$  são as coordenadas do ponto do CVDG em  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$

calculado em (A).

- D) Converte-se o sistema de coordenadas cartesianas  $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$  para coordenadas polares de acordo com a expressão 5.11.

$$\left. \begin{aligned} x' &= \rho \cdot \cos \theta \\ y' &= \rho \cdot \text{sen} \theta \\ \text{tg} \theta &= y' / x' \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$

- E) Variando-se  $\theta$ , inicia-se a partição do sistema em regiões produtivas utilizando-se o procedimento da Fig. 5.6.
- F) Para cada uma das regiões definidas a partir do procedimento da Fig. 5.6 calcula-se o ponto estratégico para o estacionamento de um VT. Para isto, aplica-se a expressão 5.12, derivada da expressão 5.2 em que  $N_k$  é o número de estações de carga/descarga na região  $k$ .

$$E_{G_k} = O' + \sum_{i=1}^{N_k} \left( \frac{D_{mi}}{\sum_{j=1}^{N_k} D_{mj}} \right) \cdot (P_i - O') \quad (5.12)$$

Onde:

$O'$  é a origem do sistema do plano  $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$ .

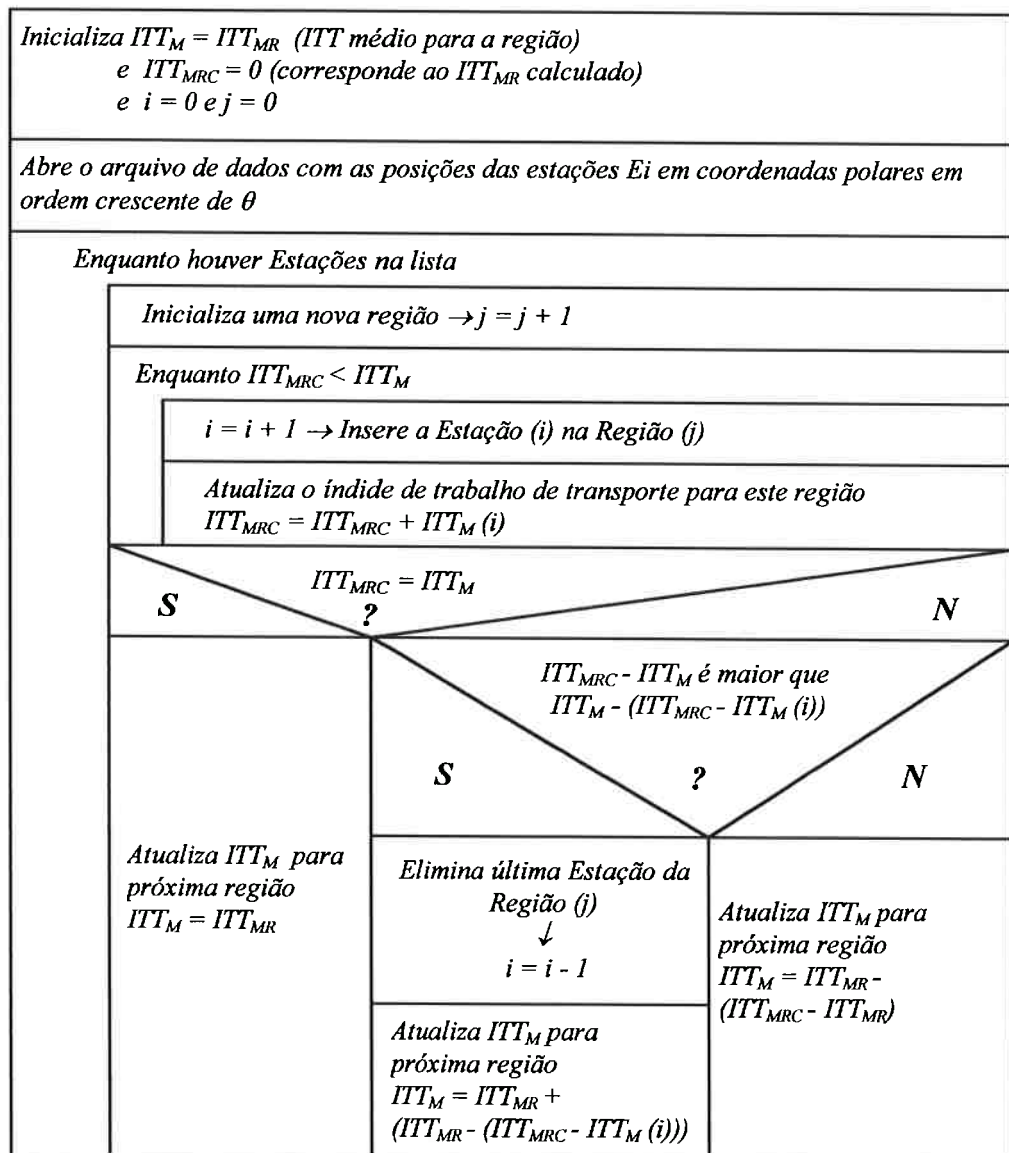
$E_{Gk}$  é a posição do estacionamento do VT em  $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$  na região  $k$ .

$D_{mj}$  é a taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação  $E_j$ ;

$P_j$  é a posição da estação de carga  $E_j$  em  $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$  no sistema.

Aplicando este conjunto de procedimentos, obtém-se um mapeamento do SAP em regiões e em cada região é definido um ponto estratégico para estacionamento de VTs que passa a ser denominado centróide virtual de demanda regional - CVDR - analogamente ao CVDG para o sistema global.

Observa-se que para calcular-se a distância entre uma determinada estação de origem e outra de destino para computar o  $ITT_{MR}$  é utilizado o método retangular ou de Manhattan pois, de acordo com HILLIER [1963] trata-se de uma medida mais realística para efeito de avaliação dos trabalhos de transporte.



Onde:

- $i \in \{1, \dots, N\}$  sendo  $N$  o número de estações
- $j \in \{1, \dots, M\}$  sendo  $M$  o número de regiões ou VTs
- $ITT_{MRC}$  é o  $ITT_{MR}$  calculado para delinear uma região
- $ITT_M(i)$  é o índice de trabalho de transporte da Estação  $i$
- $ITT_M$  é o índice de trabalho de transporte esperado para delinear uma região

Fig. 5.6 Procedimento aplicado para definição das regiões de um sistema produtivo.

## 5.5 ALGORITMO DE CONTROLE PARA MOVIMENTAÇÃO DOS VTs

Uma vez definido os pontos estratégicos de estacionamento dos VTs e as regiões que mapeiam um SAP, a próxima etapa consiste na especificação de um algoritmo de controle capaz de gerenciar efetivamente a alocação de VTs para realizarem os trabalhos de transporte pertinentes à dinâmica do sistema.

Certamente, a utilização de um sistema de transporte baseado em VTs é conveniente em virtude de sua elevada flexibilidade operacional para atender a dinâmica de um SAP.

Entretanto, é interessante ressaltar alguns fatores:

- O tempo gasto de maneira produtiva será o intervalo contado a partir do instante em que o item a ser transportado foi carregado em um VT até o instante em que a estação de carga/descarga correspondente ao destino deste item é alcançada e a descarga completada.
- Todos os intervalos de tempo gastos para o VT se locomover até a origem, carregar o material a ser transportado, enfrentar possíveis congestionamentos e descarregar o material correspondem a perdas de eficiência no que se refere ao tempo de utilização do VT envolvido no processo.

Portanto, para que a dinâmica de um sistema de transporte seja mais eficiente é necessário impor alguns critérios de avaliação para auxiliar o processo de decisão acoplado ao sistema de controle dos VTs que realizam o trabalho de transporte.



### 5.5.1 Especificação das Premissas Básicas

O cenário considerado para abordar-se o problema de controle de alocação dos VTs constitui-se em uma fila de requisições de transporte contendo  $N_{RT}$  ordens pendentes e um conjunto de  $N_{VT}$  VTs disponíveis para atender as pendências. Neste contexto, o objetivo é solucionar dois problemas básicos neste nível de controle de alocação de VTs:

- *O que* deve ser transportado e;
- *Quem* deve transportar.

A definição a respeito do que deve ser transportado consiste em arbitrar o atendimento às demandas de transporte para que não haja problemas de gargalos em determinadas áreas produtivas em virtude de uma ineficiência do processo de transporte. Os produtos que são processados com maior rapidez, exigem uma demanda maior de transporte e, por conseguinte, maior prioridade de transporte sobre os demais.

Em relação a quem deve transportar, implica em avaliar-se o custo envolvido quando os VTs circulam em vazio. Portanto, a opção tende a ser pelo VT que estiver posicionado mais próximo ao ponto de origem da demanda.

Portanto, para avaliar uma solução para o controle de alocação de VTs condizente com os problemas básicos apresentados, são enfocados dois critérios:

- Minimização do tempo de espera por transporte.
- Minimização do tempo de percurso em vazio.

Uma possível abordagem consiste em considerar este problema como sendo de múltiplos critérios. O inconveniente é que este tipo de solução implica em definir-se custos cujo

grau de subjetividade pode comprometer os resultados, principalmente quando se considera a volatilidade destes custos em relação à dinâmica destes sistemas (TEDESCHI [1997]).

O paradigma aplicado para particionar o SAP em regiões baseou-se em estabelecer uma homogeneidade quanto aos índices de trabalho de transporte de cada região produtiva. Outrossim, existe uma relação intrínseca entre trabalho de transporte e VT. Se for mantida uma estratégia de controle baseada nesta premissa, a cada região ter-se-á um determinado VT alocado para realizar a mesma quantidade de trabalho dos VTs alocados nas demais regiões. Desta forma, a disponibilidade de cada VT para atender as demandas de transporte em sua respectiva região será a mesma para todos os VTs, evitando problemas de desequilíbrio quanto ao volume de trabalho associado a cada transportador<sup>5</sup>.

Por sua vez, considerando-se as atividades de transporte internas a uma determinada região, se o VT posicionar-se no CVDR da região em questão, localizar-se-á em um ponto estratégico que o capacita a atender as requisições em intervalos de tempo menores, visto que estes são pontos de equilíbrio regionais com as mesmas propriedades do CVDG ao nível de regiões produtivas.

Portanto, as premissas básicas que devem ser aplicadas como diretrizes para a realização do controle de alocação dos VTs são:

---

<sup>5</sup> Um desequilíbrio desta natureza poderia refletir em atrasos cada vez maiores para atender-se as demandas de transporte do sistema global e percursos maiores, prejudicando-se ainda mais a eficiência do sistema para o caso dos VTs que trafegarem em vazio.

**Premissa 1.** Considerando-se um conjunto de  $M$  VTs para a realização de atividades de transporte em um sistema produtivo particionado em  $M$  regiões, a manutenção de uma uniformidade quanto aos índices de trabalho de transporte regionais deve ser uma condição necessária para realização do controle de alocação destes VTs.

**Premissa 2.** Considerando-se a dinâmica de transporte de um VT em uma determinada região, a manutenção do VT ocioso estacionado no respectivo CVDR desta região deve ser uma condição necessária para realização do controle de alocação deste VT.

### 5.5.2 Especificação do Algoritmo de Controle

Analisando-se as possíveis ocorrências de trabalho de transporte, observa-se que, em relação aos pares (*origem, destino*) coligados a uma atividade de transporte, podem ocorrer duas situações:

- A origem e o destino de um determinado trabalho de transporte pertencem a uma mesma região.
- A origem e o destino de um determinado trabalho pertencem a regiões distintas, não necessariamente adjacentes.

Para manter-se um equilíbrio quanto ao índice de trabalho de transporte associado a cada VT, é adequado manter-se um VT confinado a cada região, uma vez que o critério para definição destas regiões baseia-se em padronização dos índices de trabalho de transporte

nestas áreas, de acordo com a Premissa 1. Portanto, se as atividades de transporte pudessem ser estritamente regionais não havendo pares (*origem, destino*) que pertencessem a mais de uma região, a lógica de controle de alocação de VTs restringir-se-ia ao algoritmo da Fig. 5.7.

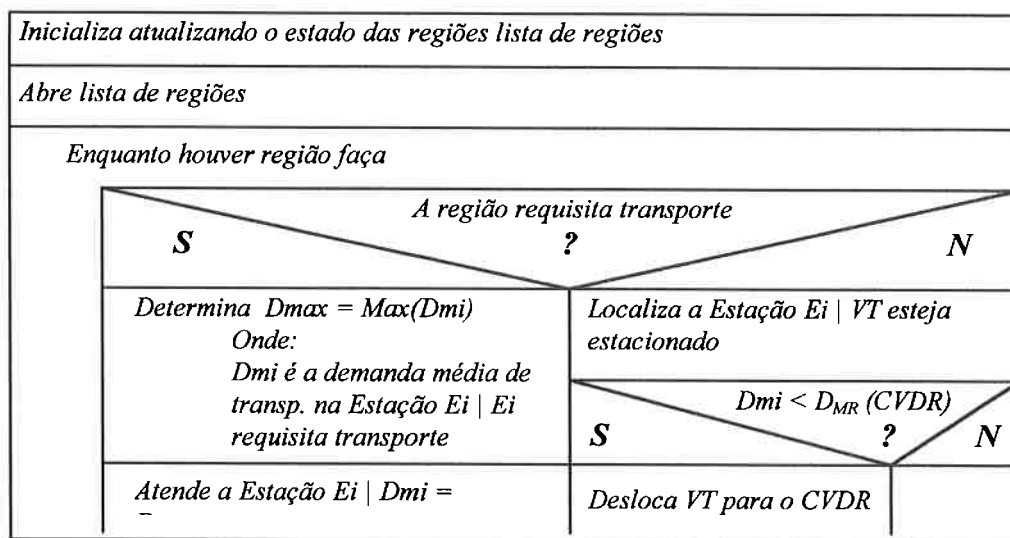


Fig. 5.7 Algoritmo de controle para movimentação de VTs confinadas em regiões

Em relação a este algoritmo (Fig.5.7) observa-se que, assumida a hipótese de que não existe fluxo de materiais entre regiões, a cada região deve-se alocar um respectivo VT, respeitando a uniformidade de volume de trabalho de transporte para cada um deles. Desta forma, para manter a eficiência do sistema de transporte, basta manter o VT em seu CVDR. Entretanto, uma vez que se deve evitar deslocamentos em vazio, foi aplicada a heurística que mantém o VT na Estação  $E_i$  se a demanda média por transporte nesta estação for maior que a demanda média no ponto correspondente ao CVDR. Esta estratégia é coerente uma vez que as Estações com uma demanda acima da média

regional atraem com maior intensidade o VT e, portanto, encontram-se mais próximas do CVDR.

Outro aspecto importante consiste no fato de existir maior prioridade para atender-se uma demanda de transporte do que posicionar o VT em seu CVDR, no caso do algoritmo da Fig. 5.7. A hipótese assumida para que esta lógica fosse considerada, baseia-se em supor que o volume de trabalho alocado para um VT é adequado para não causar atrasos de atendimento às requisições de transporte.

Entretanto, este algoritmo é ineficiente quando se considera o fato do fluxo de materiais entre regiões ser inevitável. Conforme os pontos abaixo exemplificados:

- A integração do fluxo de itens a nível regional é fundamental para a operação do sistema global.
- O planejamento do arranjo físico do sistema na maioria das vezes tem que atender restrições que resultam em estações de carga/descarga integradas logicamente mas fracamente acopladas fisicamente.

Quanto à integração de fluxo de materiais entre regiões, esta atividade de transporte pode ser considerada aplicando-se a hierarquia de controle proposta anteriormente na Fig. 5.4.

Nota-se ainda que o agrupamento dos VTs em níveis hierárquicos de transporte, de acordo com o índice de trabalho de transporte presente em cada nível é efetivo para a organização e manutenção do sistema de controle. Se for aplicada esta abordagem, o algoritmo de controle proposto na Fig. 5.7 mantém válido para o nível de controle local de transporte em cada região.

Entretanto, o problema de arranjo físico é inevitável, principalmente quando se considera sistemas produtivos que sofreram reestruturações para adequar-se à dinâmica das necessidades de mercado. Considerando-se esta questão, é possível a ocorrência de um fluxo de materiais entre regiões que não pode ser abdicado para um nível superior de controle. Desta forma o sistema pode atingir estados em que existe uma ou mais regiões sem VTs enquanto outras regiões possuem mais de um VT.

Para resolver este impasse considerou-se a seguinte estratégia de controle:

- As demandas de transporte locais devem ser atendidas a partir de um sistema de controle de alocação de VTs neste nível, ainda que o par (*Origem, Destino*) não pertença a uma mesma região (Fig. 5.8).
- A manutenção de um equilíbrio de índices de trabalho de transporte nas regiões será atribuída a um outro nível hierárquico de controle dedicado a manter a alocação de um VT para cada região (Fig. 5.9).

Uma abordagem planar para tratar-se o problema de controle em que em um extremo existe uma lista de requisições de transporte para serem atendidas e no outro existe um conjunto de VTs disponíveis, é relativamente complexa em virtude da explosão combinatória de possibilidades que surgem como alternativas para a solução do problema. Portanto, considerando-se uma plataforma de controle distribuída e hierárquica, a cada nível de controle define-se um conjunto adequado de restrições capaz de configurar adequadamente o comportamento dinâmico que se deseja para o sistema pertinente àquele nível de fluxo de informações de controle.

Em relação ao algoritmo da Fig. 5.8, o controle age de tal forma que atribui prioridade para atender as requisições de transporte nas regiões em que existe VT disponível. Desta forma, minimiza-se a possibilidade de ocorrerem perturbações, uma vez que a premissa básica para manter o equilíbrio dinâmico do sistema consiste em controlar a homogeneidade dos trabalhos de transporte dos VTs em cada região, evitando fluxos desnecessários de VTs em vazio entre regiões. Em cada região é atendida sempre a requisição mais prioritária, de acordo com as demandas de transporte de cada uma das estações para evitar gargalos dentro da própria região.

As regiões que requisitam transporte e não possuem VT são atendidas posteriormente já que envolvem o fluxo de VTs entre regiões. Por fim, considera-se o problema de alocar os  $N_{VT}$  VTs disponíveis às requisições de transporte como sendo um problema de designação que será discutido adiante.

Quanto ao controle para manter o volume de trabalho dos VTs uniforme, isto é, manter a alocação de um VT para cada região, considerou-se o algoritmo da Fig. 5.9. Em relação a este algoritmo é conveniente ressaltar que:

- Assume-se a hipótese de que se existirem regiões descobertas (sem VTs) então existem regiões com mais de um VT de maneira que o número de regiões somado ao número de VTs é constante.
- Os VTs adicionais disponíveis devem ser alocados para regiões em que há ausência de VTs.
- O fato de existir um VT realizando trabalho em uma região não significa que esta região necessita de um novo VT para que não gere uma inconsistência

em relação à premissa básica adotada relativa à uniformidade da quantidade de trabalho de transporte.

- A estratégia considerada para alocar-se os VTs disponíveis em determinado número de regiões descobertas implica também em um problema de designação que pode possuir uma solução ótima (NOVAES [1978], BRONSON [1985], PUCCINI [1987]).

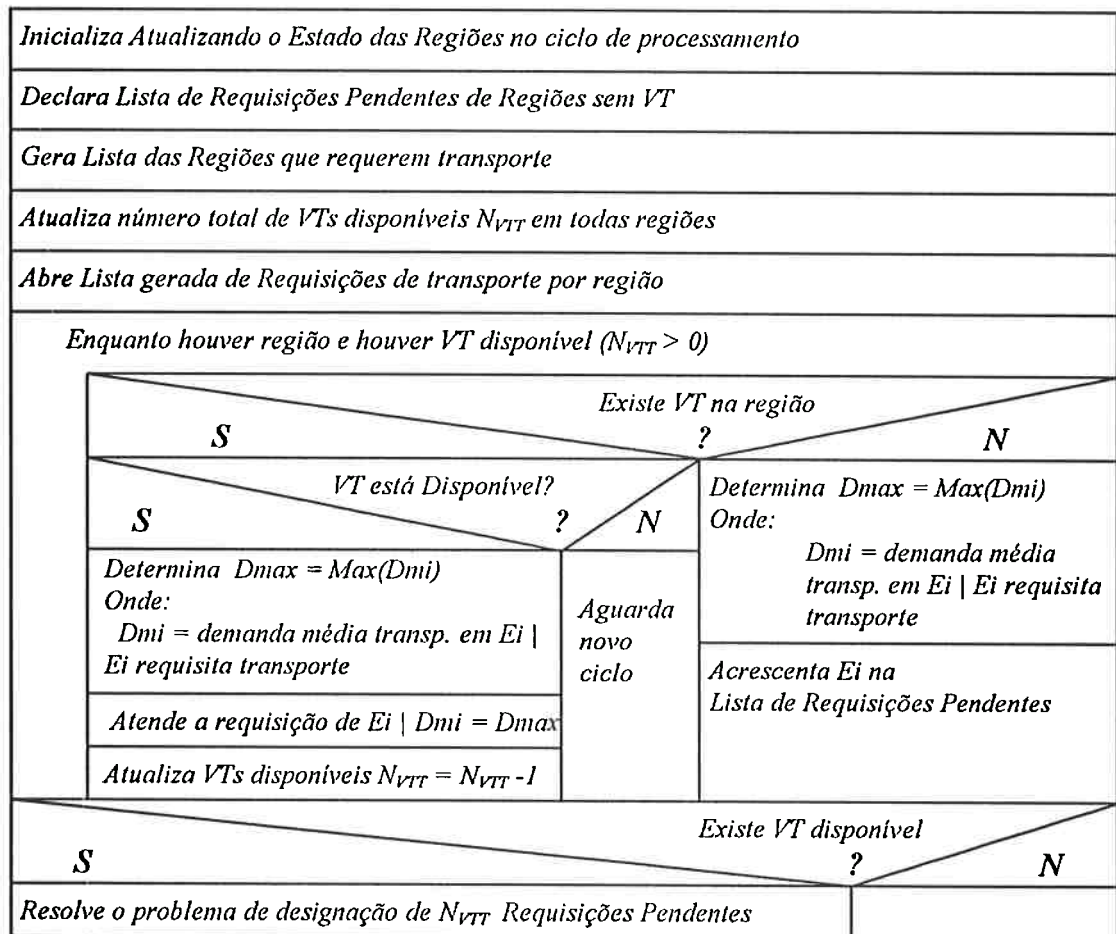


Fig. 5.8 Algoritmo de controle para alocar os VTs de acordo com as demandas de transporte



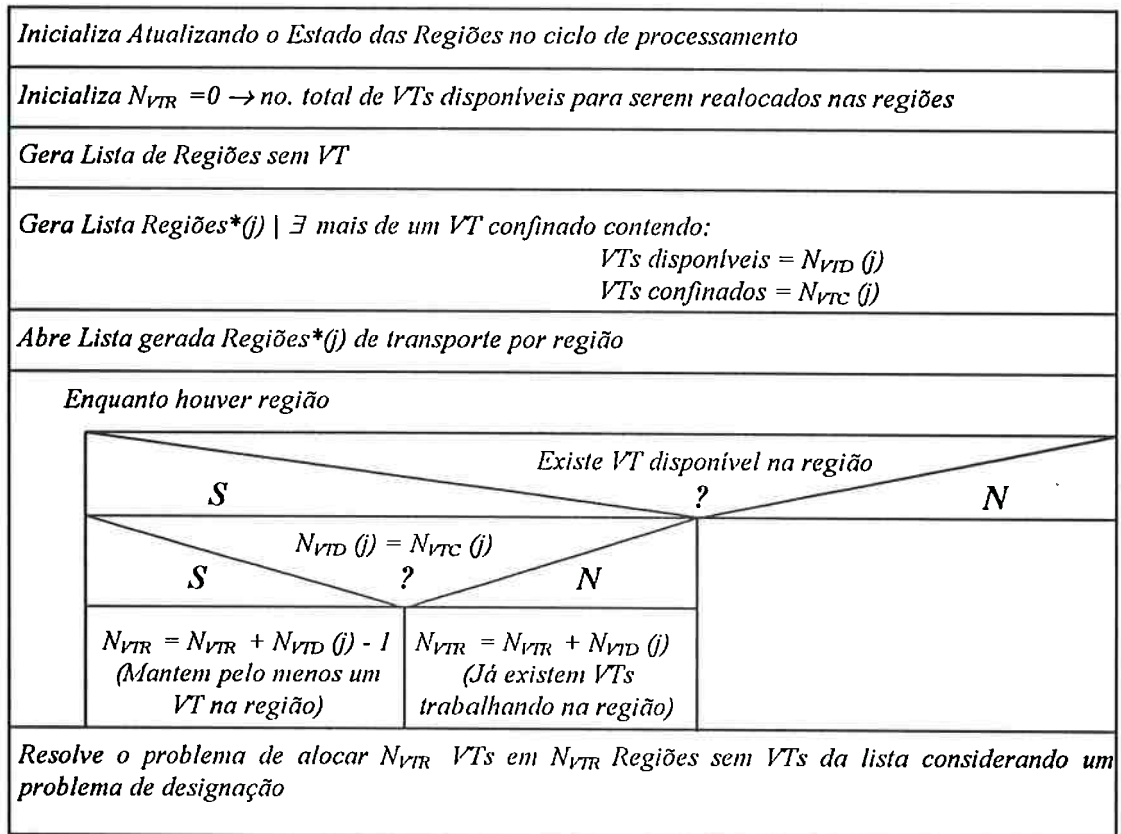


Fig. 5.9 Algoritmo de controle para manter o volume de trabalho dos VTs uniforme

Este nível de controle é executado após realizar-se o controle local descrito no algoritmo da Fig.5.8. Desta forma, os VTs disponíveis só trafegam em vazio caso estejam ociosos e não exista nenhuma requisição de transporte no respectivo ciclo de realização do controle.

### 5.5.3 Alocação Ótima de VTs

Para uma arquitetura de controle em que existe uma hierarquia, a dimensão reduzida do número de VTs efetivamente associados a um determinado nível de controle é adequada

para permitir a aplicação de critérios para obter-se de soluções ótimas para o problema de alocação destes veículos em tempo real.

A cada ciclo de processamento do controle, o que se faz é reduzir a dimensão do problema para a seguinte situação: existem  $y$  VTs e  $y$  trabalhos de transporte; são conhecidos os custos  $C_{ij}$  correspondentes a todas as combinações de VTs e trabalhos de transporte; assim, objetiva-se atribuir os trabalhos a esses VTs, de modo que o custo total seja mínimo. Esta estruturação correspondente à formulação clássica do problema de designação ou atribuição (NOVAES [1978], BRONSON [1985], PUCCINI [1987] ).

Para solucionar-se o problema de designação é possível aplicar-se o método Simplex, entretanto, da mesma forma que existem algoritmos específicos para a resolução do Problema do Transporte, existem também métodos específicos para a solução do problema de designação.

O cerne do problema consiste em estabelecer a matriz de custos ( $C_{ij}$ ) onde, ( $i$  identifica o VT e  $j$  a estação requisitante) de acordo com a expressão 5.12.

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Estações Requistando transporte} \\ E_1 & E_2 & E_3 & E_4 & \dots & E_N \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & \dots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & \dots & C_{2N} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & \dots & C_{3N} \\ \vdots & & & & & \\ C_{N1} & C_{N2} & C_{N3} & C_{N4} & \dots & C_{NN} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{VTs} \\ VT_1 \\ VT_2 \\ VT_3 \\ \vdots \\ VT_N \end{matrix} \end{matrix} \quad (5.12)$$

Para dimensionar-se estes custos é necessário que existe uma proporcionalidade entre o trabalho de transporte envolvido para deslocar uma carga da estação  $E_i$  para a estação  $E_j$  e o respectivo custo  $C_{ij}$ .

Portanto, o custo  $C_{ij}$  pode ser estimado objetivamente a partir da expressão 5.13.

$$C_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (5.13)$$

Onde:

$|x_i - x_j| + |y_i - y_j|$  é a distância retangular entre os pontos  $P_i(x_i, y_i)$  e  $P_j(x_j, y_j)$

Esta formulação proposta para estimar-se o custo de designação dos VTs em relação às requisições de transporte é adequada porque não se depara com problemas de interpretações subjetivas para atualizações destes valores e o cálculo destes parâmetros é simples e inequívoco. Desta forma, obtém-se uma solução ótima no sentido de minimizar o percurso em vazio dos VTs.

Em relação ao tempo de atendimento, uma vez que se considera como premissa básica conservar a uniformidade da quantidade de trabalho para os VTs, automaticamente este critério é considerado.

Por definição, o número de VTs e o número de regiões requisitando o transporte deve ser o mesmo para que este problema possa ser tratado como um problema de designação. Entretanto, esta condição não é sempre verdadeira, uma vez que é possível o sistema atingir estados em que o número de VTs disponíveis é inferior ao número de regiões que necessitam de transportadores e vice-versa. Nestas situações, a solução

consiste em criar-se transportadores fictícios ou estações fictícias, respectivamente, até que a condição de igualdade seja satisfeita. A estes VTs ou estações fictícias associa-se custos elevados (da ordem de  $10^{10}$ , por exemplo) de maneira que não comprometam a solução do problema.

Para se obter a designação de custo mínimo a partir da matriz de custos, pode-se aplicar o Método Húngaro (BRONSON [1985]). Este método associa critérios básicos de redução de matrizes e métodos racionais baseados no algoritmo de Ford-Fulkerson para obtenção de máximo fluxo (NOVAES [1978]).

O Anexo B contém um detalhamento do algoritmo baseado no Método Húngaro a ser aplicado para os problemas de designação citados neste trabalho.

## 5.6 ESTUDO DE CASO

Os procedimentos e algoritmos de controle propostos neste Capítulo foram considerados no estudo de caso de um sistema de manufatura real (planta industrial) composto por um sistema de transporte constituído por 6 transportadores que rebocavam carretas carregadas de peças. O número de carretas disponíveis considerado foi de cerca de 90 para a realização do transporte destes itens em uma área de aproximadamente  $900.000\text{m}^2$ . A Fig. 5.10 apresenta um modelo da planta correspondente ao chão de fábrica do sistema em questão.

Estes veículos eram dirigidos por motoristas, o que garantia um elevado nível de autonomia e flexibilidade operacional ao sistema de transporte.

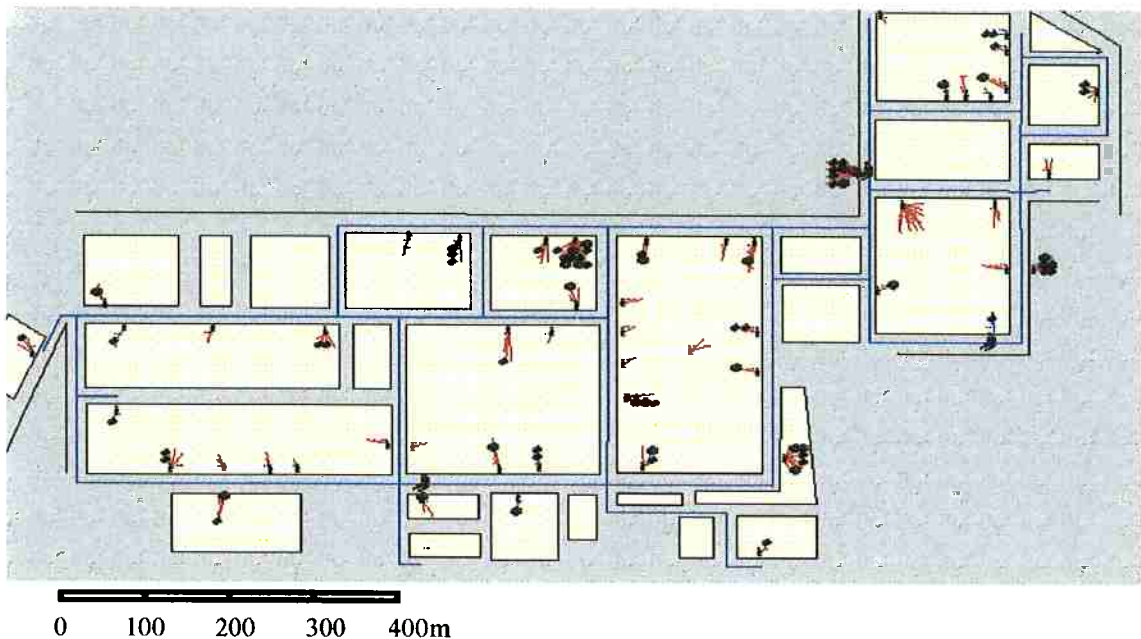


Fig. 5.10 'Layout' da instalação de uma planta de uma indústria de manufatura com a indicação das estações de carga e descarga de veículos transportadores.

Todavia, existiam dificuldades em aprimorar o desempenho do sistema em virtude da complexidade da dinâmica do mesmo, causada por duas características fundamentais:

- Em primeiro lugar, os motoristas de cada transportador correspondiam aos operadores geradores de eventos não controláveis. Existia apenas a delimitação de uma região a ser percorrida por cada transportador, não sendo especificado qualquer controle sobre as rotas realizadas, isto é, o operador possuía total liberdade neste sentido.
- Existia um 'gap' entre as informações de controle (estratégias teóricas obtidas através de técnicas de otimização tradicionais) das linhas de produção e o sistema de transporte, dificultando um ajuste fino entre estas partes, uma

vez que envolviam a produção de mais de 2000 itens diferentes a serem transportados entre diferentes estações de carga e descarga.

A existência destes problemas motivaram a aplicação da técnica de particionamento da planta em regiões (apresentada na seção 5.4), atribuídas a cada transportador, permitindo inclusive a interação com as linhas de produção no sentido de estabelecer uma quantidade mínima de informações pertinentes apenas à demanda média de transporte esperada para cada uma das estações de carga e descarga do sistema.

Em relação ao aprimoramento do desempenho do sistema existem dois fatos relevantes:

- Em uma primeira instância, obtém-se um equilíbrio em termos de volume de trabalho de transporte a partir do momento em que se considera uma estrutura reativa (apresentada nas seções 5.3 e 5.4) para responder em tempo real às informações oriundas das linhas de produção, capaz de reestruturar as delimitações de cada região dinamicamente, de acordo com as necessidades ou estado global do sistema de produção.
- Em segundo lugar, foram concebidos procedimentos de controle que otimizam os percursos, minimizando os custos de transporte de acordo com uma abordagem que considera o problema de alocação como sendo um problema de designação em que se aplica o método Húngaro (apresentado na seção 5.5).

Foi assim desenvolvida uma série de estudos de modelagem em E-MFG dos vários fluxos de itens realizados pelos transportadores, incluindo a modelagem da dinâmica dos próprios transportadores e sua interação com as carretas e as empilhadeiras de acordo

com um detalhado trabalho de levantamento de dados experimentais realizado junto aos operadores. Estas informações foram especificadas criteriosamente, aplicando-se os princípios básicos da metodologia proposta por MIYAGI [1996] (discutida em detalhes no Capítulo 6) utilizando-se diagramas do tipo *origem-destino* documentadas na forma de tabelas conforme consta no Anexo C.

A partir da experiência adquirida durante estes ensaios incluindo o levantamento das necessidades reais do sistema a partir de uma série de entrevistas realizadas com os operadores do sistemas de transporte, seus gerentes e inspetores de linha é que foi possível avaliar as propostas apresentadas neste Capítulo, principalmente no que se refere às estratégias de controle.

## 5.7 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES

Neste Capítulo foi proposto um sistema de controle reativo para a alocação de VTs que realizam o fluxo de materiais em um SAP. Os parâmetros de entrada para a realização do controle são os índices de demanda média de transporte  $D_{mi}$  de cada estação de carga/descarga  $E_i$  e as requisições de transporte que surgem durante a evolução dinâmica do sistema em si. Como saída, o sistema de controle designa *quem* deve transportar *o que*, isto é, aloca os VTs para executarem as pendências de transporte.

A estratégia de controle consiste em particionar o sistema em regiões produtivas de maneira que existe uma homogeneidade em termos de quantidade de trabalho de transporte em cada uma destas áreas. Além disso, a cada região associa-se somente um único VT.

Em relação às regiões, determina-se um ponto estratégico adequado para o estacionamento do VT em cada uma delas: o CVDR - centro virtual de demanda regional.

Para manter os VTs nestas regiões apesar da dinâmica do sistema foram propostos algoritmos de controle que buscam uma solução ótima para alocá-los de acordo com as requisições de transporte pendentes.

Sempre que ocorrer uma alteração nas condições do sistema no que se refere à interação do sistema produtivo com o meio ou se ocorrer uma variação abrupta nos níveis de demanda  $D_{mi}$ , o sistema de controle reage realizando um novo particionamento da planta em regiões e adaptando o controle do transporte às novas condições de quantidade de trabalho. O mesmo procedimento ocorre se existir uma variação no número de VTs disponíveis para atender o sistema.

Desta forma, apresentou-se uma aplicação dos princípios de sistemas antropocêntricos para tratar o problema de controlar VTs em tempo real na realização do transporte de materiais em um SAP.

Ao mesmo tempo em que se aplicou técnicas para automatizar o controle de alocação dos VTs em regiões para que o transporte fosse executado dentro de critérios de otimização das distâncias percorridas e minimização do tempo de atendimento às requisições de transporte, houve uma preocupação em desenvolver um interfaceamento adequado do sistema de controle com o operador para que este pudesse interagir efetivamente com o sistema de controle a qualquer instante e interferir na evolução dinâmica deste, resultando em uma proposta de arquitetura de SAP reativo.



A seguir, no Capítulo 6, apresenta-se um conjunto de procedimentos que direcionam o projeto de sistemas de controle de SAPs, incluindo os aspectos aqui introduzidos.

## CAPÍTULO 6

# PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE SAPs

Em MIYAGI [1996] há uma descrição de uma metodologia para o projeto de sistemas de controle de sistemas produtivos. Considerando-se a natureza dos sistemas abordados, esta metodologia baseia-se em procedimentos clássicos que direcionam a tarefa de desenvolvimento de 'software' em engenharia da computação (PRESSMAN [1992]). Neste sentido, é introduzido o conceito de ciclo de vida do sistema de controle de acordo com a Fig. 6.1.

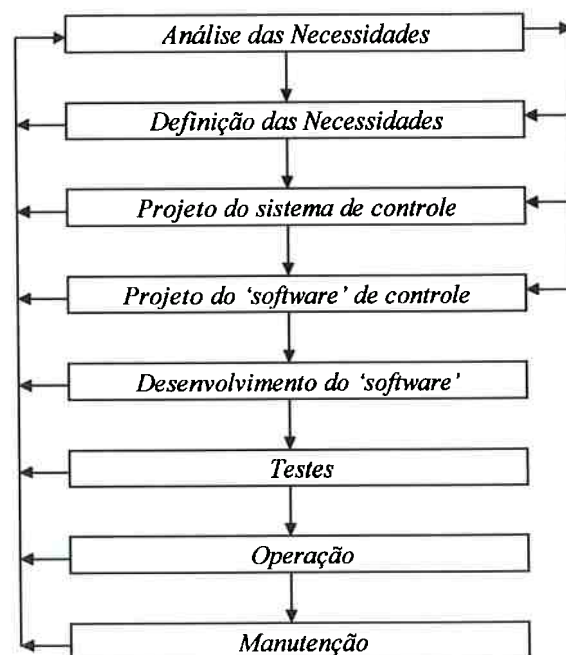


Fig. 6.1 Ciclo de vida de um sistema de controle

A realização de cada uma das etapas de desenvolvimento do sistema envolve o conceito de prototipagem, repetindo-se ciclicamente o procedimento descrito na Fig. 6.2. Desta forma, é possível tratar-se gradativamente as dificuldades existentes em sistemas que apresentam maior complexidade tanto estrutural quanto comportamental e refinar gradativamente os modelos para obter-se um nível de fidedignidade adequado.

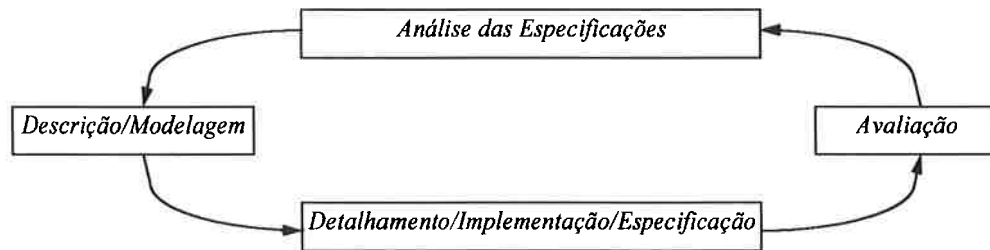


Fig. 6.2 Ciclo de Prototipagem

Considerando-se estas características, uma metodologia dedicada ao desenvolvimento de sistemas de controle deve suportar:

- Técnicas de reutilização baseadas em Inteligência Artificial.
- Técnicas de simulação das operações durante as diversas fases de desenvolvimento do projeto.
- Técnicas de modelagem baseadas em Rdp interpretadas para o projeto estruturado e representação efetiva dos procedimentos de controle.
- Técnicas que incorporem interfaces gráficas e esquemáticas para a modelagem da evolução dinâmica dos sistemas.

Neste Capítulo introduz-se uma extensão à metodologia proposta em MIYAGI [1996] para o projeto de sistemas de controle de SAPs. Neste sentido, são analisadas as várias atividades relativas a cada uma das etapas de projeto e sempre que for necessário são adicionados procedimentos para especificar adequadamente o comportamento dinâmico e a estrutura dos sistemas produtivos desta natureza.

Estes procedimentos adicionais visam introduzir as várias técnicas de modelagem e controle propostas nos Capítulos anteriores para projetar efetivamente sistemas de controle de SAPs, destacando-se as interfaces com o elemento humano e sua participação nas tomadas de decisões e evolução do comportamento dinâmico do sistema durante todo o ciclo de vida do mesmo.

## **6.1 EXTENSÃO À METODOLOGIA PADRÃO**

Ainda que exista uma enorme variabilidade em relação ao porte dos sistemas existentes e que possam vir a ser objeto de estudo, a metodologia a ser utilizada, proposta por MIYAGI [1996], aborda o conteúdo dos procedimentos de controle que normalmente independe da dimensão do sistema. Este conteúdo, por sua vez, envolve as atividades descritas na Tabela 6.1.

A cada uma das etapas descritas anteriormente no ciclo de vida do sistema de controle são associadas atividades que devem ser realizadas no sentido de racionalizar o processo de desenvolvimento do sistema de controle.

Tabela 6.1 Atividades contidas em procedimentos de controle de um sistema de controle.

<b>Etapas</b>	<b>Atividades</b>
<i>Análise de Necessidades</i>	1. Identificação do objetivo final do sistema.
	2. Compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos.
	3. Organização dos conhecimentos sobre o sistema de controle (dispositivo de controle, equipamentos periféricos, etc.).
	4. Abstração e análise das funções de controle.
<i>Definição das Necessidades</i>	5. Definição das funções de controle.
	6. Definição do fluxo das funções de controle.
<i>Projeto do Sist. de Controle</i>	7. Divisão das funções e definição das interfaces.
	8. Definição e alocação dos sinais de entrada e saída.
	9. Definição da estrutura do programa de controle.
<i>Projeto do 'Soft.' De Controle</i>	10. Projeto da reutilização.
	11. Projeto dos programas.
	12. Projeto de programas não padronizados.
<i>Des. 'Soft.' de Controle</i>	13. Desenvolvimento do programa e seu carregamento nas máquinas.
<i>Testes</i>	14. Teste por módulo.
	15. Teste do sistema global.

Estas etapas não precisam ser necessariamente realizadas na forma seqüencial, podendo ser conduzidas paralelamente, otimizando o tempo de desenvolvimento do sistema em sí.

Em relação as fases de operação, manutenção e testes é importante ressaltar que não são independentes das fases anteriores de projeto, pois refletem exatamente o que foi projetado e, portanto, constituem verdadeiros sinalizadores de problemas causados por falhas durante o projeto e/ou desenvolvimento do sistema. Portanto, é extremamente importante considerar-se a realimentação de informações provenientes destas etapas. O

problema torna-se mais grave quando ocorrer uma falha na análise das necessidades em virtude da omissão de alguma característica importante para descrever adequadamente o comportamento do sistema. Nestas situações é necessário rever todas as etapas de projeto a partir da redefinição das necessidades.

Aplicando-se esta metodologia é possível aprimorar-se a atividade de desenvolvimento de sistemas produtivos buscando atender de uma forma mais adequada as necessidades do usuário, operador e clientes, resultando em projetos estruturados, formalmente documentados e de fácil interpretação que permitem reutilização e atualizações sistemáticas, culminando com o fato de que existe uma minimização dos custos durante todo o ciclo de vida do sistema de controle.

Em MIYAGI [1996] há um detalhamento minucioso de cada uma destas atividades de projeto que constituem a metodologia em questão que passa a ser denominada **“metodologia padrão”**.

Para o caso de pretender-se desenvolver sistemas de controle de SAPs, faz-se necessário acrescentar determinados procedimentos para descrever efetivamente as estratégias de controle desta classe de sistemas produtivos.

A premissa básica que deve ser considerada para orientar o projeto do sistema de controle de um SAP consiste no fato de considerar-se que existe um objeto de controle que representa os dispositivos físicos correspondentes aos recursos existentes no sistema, um conjunto de processos a serem realizados e um sistema de transporte para executar o fluxo de materiais no SAP. Ainda que esta premissa pareça ser elementar e dispensável, sua importância é justificada por alguns aspectos a serem considerados a seguir.

O desenvolvimento do controle destes sistemas consiste basicamente em definir-se criteriosamente o seqüenciamento das etapas de produção inerentes a cada processo e a forma como será realizado o fluxo de materiais que integra os recursos disponíveis para realização de cada um destes processos. Neste aspecto, já existe um novo parâmetro a ser considerado que se refere a possibilidade de gerenciar-se o fluxo de materiais através de compensadores para que não ocorram possíveis travamentos no sistema causados pelo controle inadequado deste fluxo. Portanto, é necessário adicionar-se procedimentos para representar estas estratégias de controle suplementares que relacionam-se estritamente com a evolução dinâmica dos processos.

Outro aspecto importante, consiste no fato de ter sido proposta uma discriminação do sistema de controle em uma parte correspondente ao controle do processo e outra parte correspondente ao controle do transporte dos itens processados. Esta abordagem justifica-se porque é possível existir um sistema de transporte baseado em VTs de elevada flexibilidade operacional que exige a definição de estratégias de controle mais elaboradas para que o transporte seja realizado adequadamente, utilizando-se os transportadores de maneira eficaz.

Baseado nestes fatos, considera-se três partes fundamentais a serem modeladas para abordar o problema de desenvolvimento do sistema de controle dos SAPs. A saber:

- Parte correspondente ao objeto de controle.
- Parte correspondente ao conjunto de processos.
- Parte correspondente aos transportadores autônomos para rotas genéricas.

Este particionamento proposto para modelar-se concretamente o comportamento dinâmico de um SAP, corresponde a uma diretriz preliminar para orientar a realização das várias atividades que compõem os procedimentos de projeto do sistema de controle.

A seguir, considerando-se a Tabela 6.1, são apresentadas as atividades básicas de cada etapa e os procedimentos adicionais que devem ser agregados a cada uma delas para tornar a tarefa de desenvolvimento de sistemas de controle de SAPs mais eficiente.

## **6.2 A ETAPA DE ANÁLISE DE NECESSIDADES**

Esta etapa inicial deve ser desenvolvida com bastante cuidado e exige:

- Um amplo conhecimento de todo o sistema (as máquinas, os periféricos e as interfaces homem-máquina).
- Uma forte integração de toda a equipe envolvendo desde o projetista até o fornecedor.
- Uma aplicação contínua do conceito de prototipagem para se obter um refinamento progressivo dos resultados obtidos.

Entretanto, deve-se atentar para o fato de que o nível de detalhamento não deve ser exagerado, dependendo muito da experiência dos envolvidos, pois a finalização desta etapa é indeterminada justamente por causa deste fato. Geralmente, um detalhamento criterioso é realizado nas etapas posteriores de projeto do sistema de controle e do 'software' propriamente dito.



Sendo assim, o ponto de partida deve ser a determinação de um conjunto de metas que devem ser atingidas e que constituem o objetivo final. Estas metas podem basear-se em múltiplas abordagens, considerando, por exemplo, aspectos de otimização da especificação do sistema (minimizar tempo de processamento, gastos de energia, etc.) ou então, otimização dos recursos humanos (aprimorar o nível de conhecimento e capacidade de tomada de decisões) dentre várias outras possibilidades (MIYAGI [1996]).

Identificando-se quais as metas almejadas, prossegue-se para uma das atividades fundamentais correspondente à compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos. Na metodologia padrão é proposto elaborar-se diagramas esquemáticos do objeto de controle e da infra-estrutura necessária, bem como listas de especificação dos atuadores, detectores e intertravamentos.

Entretanto, pode-se acrescentar mais uma atividade nesta etapa de projeto. Consiste em modelar-se a funcionalidade de cada dispositivo presente no objeto de controle utilizando a metodologia PFS-R/E-MFG como meio de obter-se um modelo consistente do comportamento dinâmico de cada um dos dispositivos independentes que constituem o objeto de controle, conforme sugere a Fig. 6.3.

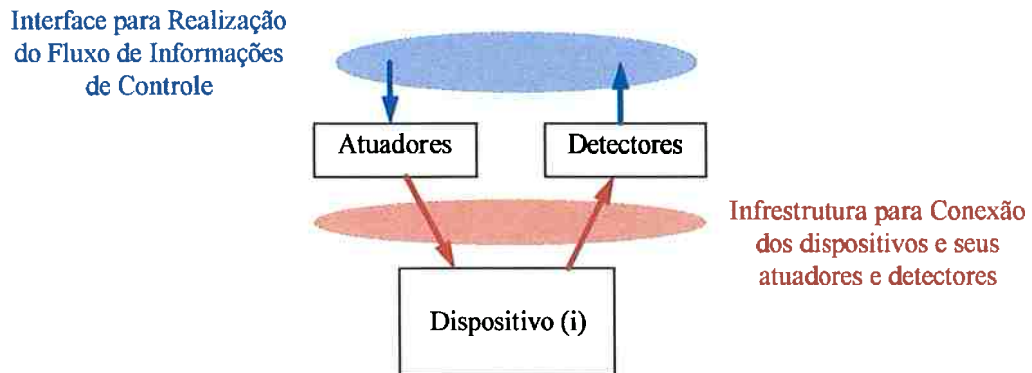


Fig. 6.3 Modelagem dos elementos do Objeto de Controle

Modelando-se cada um dos blocos em E-MFG gera-se efetivamente um modelo funcional de cada um dos dispositivos que constituem o objeto de controle. Estes modelos podem ser validados individualmente por simulação, constituindo-se em verdadeiros protótipos E-MFG dos vários elementos do objeto de controle. Uma vez que o E-MFG possui elementos temporizadores, é possível utilizar estes recursos para obter-se inclusive medidas quantitativas para avaliar o desempenho do sistema.

Aplicando-se este procedimento para os vários elementos que constituem o objeto de controle, obtém-se uma biblioteca de modelos E-MFG que podem ser interpretados como macros para validar o sistema de controle a ser projetado. Desta forma, existe uma série de vantagens que podem ser conquistadas realizando-se esta atividade de modelagem já nesta etapa de projeto:

- Obtém-se uma descrição formal correspondente à especificação de cada elemento físico do sistema.

- O protótipo de cada elemento do objeto de controle é representado pela mesma técnica utilizada para projetar o sistema de controle, não existindo problemas de ‘gaps’ semânticos.
- Amplia-se o poder de análise do sistema, uma vez que se torna imediata a tarefa de variar-se parâmetros do objeto de controle a fim de avaliar-se o impacto destas alterações nas estratégias de controle que estão sendo analisadas.
- Viabiliza a reutilização dos modelos dos elementos do objeto de controle, reduzindo progressivamente o tempo de desenvolvimento a cada novo projeto.
- Aprimora-se a capacidade do projetista em desenvolver novos projetos e em analisar alternativas mais eficazes para controlar efetivamente os sistemas em estudo, intensificando o processo de reutilização.

A Fig. 6.4 ilustra um exemplo de modelagem utilizando o E-MFG para representar a funcionalidade de um torno capaz de operar com um conjunto de cinco ferramentas diferentes. O parâmetro  $a$  corresponde a um dos atributos da marca que informa qual das ferramentas deve ser utilizada para o processamento. Os intervalos de tempo  $\Delta T_i$  simulam um tempo médio de processamento correspondente à usinagem utilizando a ferramenta  $i$ .

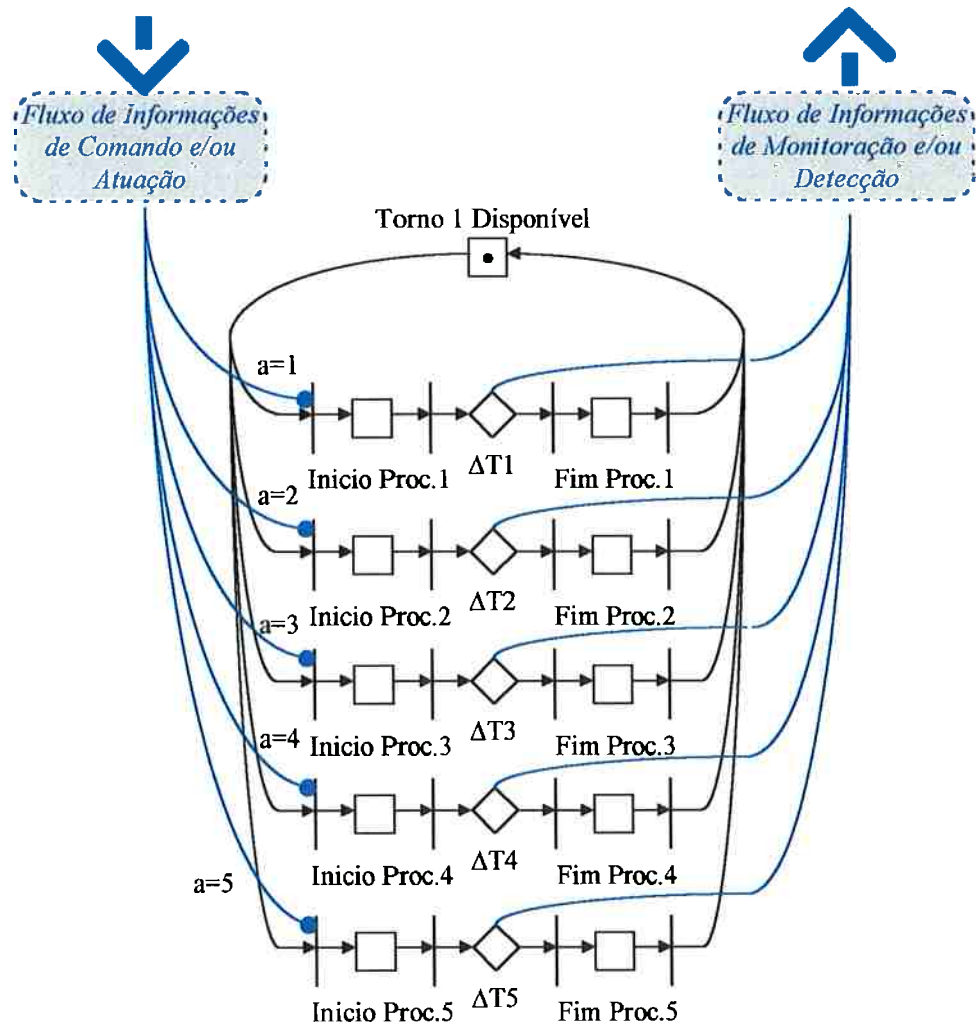


Fig. 6.4 Exemplo de modelagem do Objeto de Controle em E-MFG

Para finalizar esta etapa de análise das necessidades resta identificar-se e analisar as funções de controle. Esta atividade é realizada a partir da síntese de diagramas derivados de Engenharia de valores, de acordo com MIYAGI [1996]. Estes diagramas sistematizam o inter-relacionamento entre as funções através de uma estrutura hierárquica, a partir da aplicação de um procedimento que consiste em elaborar o seguinte questionamento:

- Para funções de nível superior: *porque esta função é necessária?*
- Para funções de nível inferior: *como esta função será realizada?*

O resultado é um diagrama com uma estrutura do tipo ilustrada na Fig. 6.5. A cada novo nível incrementa-se o detalhamento das funções de controle, de acordo com a metodologia padrão. O Anexo D apresenta, como exemplo, um projeto com a descrição das funções de controle utilizando estes diagramas de valores.

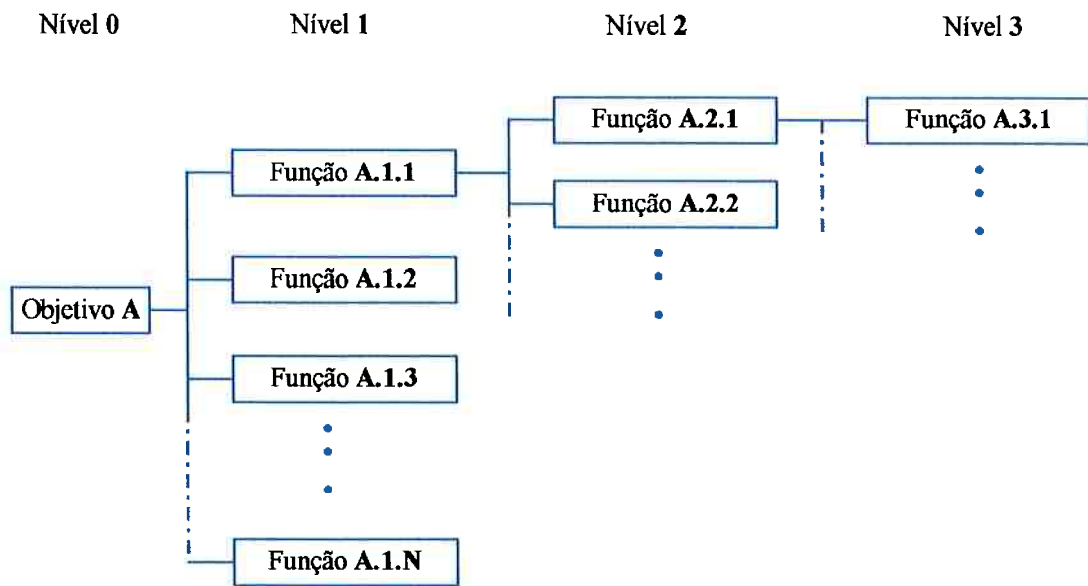


Fig. 6.5 Diagrama de estruturação das funções de controle

### 6.3 DEFINIÇÃO DAS NECESSIDADES

Nesta etapa realiza-se uma documentação das especificações do sistema de controle elaborados com a finalidade básica de servir como referência para direcionar as próximas etapas de projeto do sistema de controle, incluindo as partes de 'software' e 'hardware'.

ao mesmo tempo em que se constitui em uma interface de comunicação com os usuários, clientes e operadores para obter-se uma aprovação em relação às funções de controle definidas para representar o comportamento desejado para o sistema. Sendo assim, trata-se também de um referencial importante para orientar os testes futuros a serem realizados no sistema.

A definição das funções de controle implica em definir-se os dispositivos que interfaceiam com o dispositivo de realização do controle, de acordo com a Fig. 6.6.



Fig. 6.6 Arquitetura do dispositivo de controle

De acordo com metodologia padrão gera-se nesta etapa:

- A documentação correspondente às listas dos atuadores, detectores e dispositivos de comando e monitoração. Todos estes dispositivos podem ser modelados a partir de grafos E-MFG, procedendo de maneira análoga a que foi exemplificada para o caso do torno na seção anterior (Fig. 6.4).

- A lista dos intertravamentos necessários para operação adequada do sistema (exemplificado na Fig. 3.4 no Capítulo 3) e os diagramas definitivos das funções de controle e do sistema de alimentação de energia.
- O fluxo das funções de controle e propostas de tratamento de falhas.

Em relação ao fluxo das funções de controle, este deverá ser representado através de grafos PFS-R/E-MFG em virtude das facilidades apresentadas para modelar-se a evolução dinâmica dos SAPs nestas redes, uma vez que permitem o desenvolvimento dos modelos por refinamentos sucessivos e em blocos funcionais admitindo uma representação estruturada.

Portanto, é nesta etapa que se modela definitivamente todos os processos a serem realizados no SAP. Neste contexto, para evitar-se falhas no comportamento dinâmico de um SAP devido a um controle indevido do fluxo de itens projeta-se os compensadores de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 4. A saber:

- Construir o modelo GAR do sistema a partir dos modelos E-MFG obtidos na descrição dos processos (de acordo com a Fig. 4.3 do Capítulo 4).
- Aplicar o algoritmo da Fig. 4.9 do Capítulo 4 para obtenção dos CFEs.
- Aplicar os procedimentos da seção 4.4.3 para obtenção de um conjunto mínimo de compensadores.
- Adotar os métodos de compensação descritos na seção 4.4.1 para inserir os compensadores nos modelos E-MFG do fluxo das funções de controle adequadamente.

É importante observar que este procedimento procura valorizar o elemento humano no processo de controle do SAP uma vez que este será o responsável pela adequação dos métodos de compensação às necessidades do sistema sempre que for necessário intervir nos processos a serem executados no SAP. Além disso, o fato de utilizar-se um conjunto mínimo de compensadores otimiza a atividade de realizar futuras atualizações no sistema já que as alterações provocadas pelos compensadores no modelo do controle são sempre as menores possíveis.

Explorando o sistema do Capítulo 5, quando os elementos que constituem o sistema de transporte corresponderem a transportadores para rotas fixas, isto é, do tipo roletes, correias etc., existe a necessidade de controlar-se apenas a partida destes dispositivos (quando for pertinente) e as atividades de carga e descarga de materiais. Portanto, como as atividades de carga e descarga podem ser incorporadas nas etapas inicial e final de cada processo (de acordo com a definição de seqüência de etapas de produção de cada processo apresentada no Capítulo 4), não é necessário tratar-se o problema de controle de transporte de materiais distintamente do problema de controle de seqüenciamento dos processos nestas situações específicas. Sendo assim, basta modelar-se estes dispositivos como sendo parte integrante do objeto de controle, similarmente ao que foi efetuado para o exemplo do torno (Fig. 6.4).

Entretanto, se o sistema de transporte basear-se em VTs, para que exista um controle que otimize o transporte de materiais em um SAP, é necessário elaborar algumas atividades relacionadas à especificação dos dados de entrada necessários para aplicar-se os critérios de controle descritos no Capítulo 5.



Neste sentido, deve-se gerar uma lista de todas as estações de carga/descarga especificando-se a posição geográfica de cada uma delas, utilizando-se como referencial um sistema de coordenadas ortogonais  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ . A Tabela 6.2 apresenta um exemplo de listagem de estações de carga/descarga de um sistema produtivo.

Tabela 6.2. Posição física das estações de carga/descarga de um SAP.

<b>Estação de Carga/Descarga</b>	<b>Coordenadas (metros)</b>
EST_1	(10,500)
EST_2	(30,800)
EST_3	(50,200)
EST_4	(80,100)

Outra informação que deve ser especificada corresponde à descrição de todas as taxas médias de transporte por unidade de tempo de todos os produtos que devem ser processados no sistema. A Tabela 6.3 exemplifica uma lista com estas informações.

Tabela 6.3 Programação dos produtos a serem processados em um SAP

<b>Produto</b>	<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Demanda (unid./hora)</b>
PROD_A	EST_1	EST_4	12
PROD_B	EST_2	EST_6	15
PROD_C	EST_3	EST_13	19
PROD_D	EST_4	EST_25	24
PROD_E	EST_5	EST_39	32

A partir destes dados, o sistema de controle estima o CVDG (Centro Virtual de Demanda Global) do sistema, o CVDR (Centro Virtual de Demanda Regional) e estima o  $ITT_{MR}$  (Índice de Trabalho médio de Transporte por região) para mapear adequadamente o SAP em regiões.

Em relação ao controle dos transportadores, o operador pode interagir fortemente com o sistema pois à medida em que pressentir uma variação no níveis de demanda de cada produto, poderá realimentar estas informações para o sistema de controle do SAP que reagirá realizando um novo mapeamento do sistema reconfigurando as regiões.

#### **6.4 ETAPA DE PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE**

De acordo com MIYAGI [1996], esta etapa implica inicialmente na definição dos dispositivos de controle a partir da alocação efetiva das funções de controle que podem ser classificadas em níveis hierárquicos correspondentes ao níveis de gerenciamento, operação manual, dispositivos de atuação, comando, etc..

Nestas atribuições deve-se considerar o campo de ação de cada dispositivo para dimensionar-se a influência do mesmo no comportamento do sistema global, bem como a possibilidade de realizar-se atualizações e/ou expansões, velocidade de resposta, a influência das condições ambientais e fatores econômicos. Caso as funções de controle sejam distribuídas em vários dispositivos de controle, pode-se utilizar arquiteturas distribuídas ou hierarquizadas em níveis superiores de gerenciamento e de planejamento.

A próxima atividade pertinente a esta etapa consiste em definir-se a nível de camada física a alocação dos sinais de I/O de acordo com as unidades de entrada e saída dos dispositivos de realização do controle, considerando características relativas à velocidade de resposta, imunidade a ruídos, confiabilidade de contatos, capacidade de carga, capacidade de expansão, etc..

Finaliza-se esta etapa com a definição da estrutura do programa de controle que deve suportar características pertinentes à facilidade de interpretação e manutenção dos programas, visando procedimentos de manutenção, expansão e reutilização, bem como a possibilidade de divisão em níveis envolvendo velocidades de processamentos diferentes, compatíveis com as funções de controle envolvidas. Por fim, deve-se ainda prever facilidades para a execução dos procedimentos de teste para validação dos programas.

## **6.5 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO ‘SOFTWARE’ DE CONTROLE**

Estas etapas consistem em implementar a lógica das funções de controle estabelecidas nas etapas anteriores no dispositivo de realização do controle (MIYAGI [1996]).

Para que o desenvolvimento seja efetuado de maneira eficiente aplicam-se técnicas de padronização e reutilização de programas. Neste contexto, procura-se definir módulos elementares de controle de propósito geral e, a partir destes módulos, elabora-se macros que correspondem a módulos funcionais costumados para cada área de aplicação e para cada tipo de máquina.

Quanto a aplicação de técnicas de reutilização, MIYAGI [1996] considera duas abordagens fundamentais. Existe o método que se baseia em classificar formas padronizadas de ‘software’ em módulos funcionais. Estes módulos devem considerar criteriosamente a variedade de aplicações existentes, descrevendo com precisão seu ciclo de processamento e nível de utilização, seus parâmetros e as regras para as suas aplicações. O outro método consiste basicamente em elaborar-se um programa base configurável para cada aplicação dentro de uma determinada área. Neste sentido, deve

existir o cuidado de elaborar-se um programa cuja estrutura seja de fácil expansão ou modificação havendo uma descrição adequada das funções de controle e de seus inter-relacionamentos.

A Fig. 6.7 ilustra um exemplo de arquitetura de programação em que se elabora módulos funcionais que se inter-relacionam constituindo um programa principal.

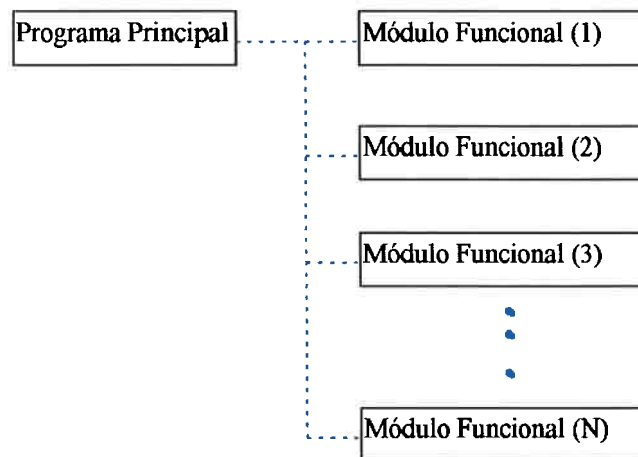


Fig. 6.7 Exemplo de estrutura de programa segmentada em módulos funcionais

Considerando um modelo PFS-R/E-MFG dos processos a serem executados em um SAP, a cada etapa da seqüência de produção de um destes processos corresponde uma determinada atividade que será realizada envolvendo o recurso adequado. Por sua vez esta atividade em particular pode ser refinada adequadamente para se realizar efetivamente o fluxo de informações entre o controle e a máquina que realiza o processo em sí conforme exemplificado anteriormente na Fig. 3.7 do Capítulo 3. Neste contexto, aos sub-grafos correspondentes às etapas de controle do processo no nível  $n+1$

relaciona-se os módulos funcionais e ao grafo de controle no nível  $n$  relaciona-se o programa principal. A Fig. 6.8 ilustra este relacionamento.

A Fig. 6.7 e a Fig. 6.8 são exemplos que ilustram uma estrutura em dois níveis. Entretanto, o número de níveis pode ser extrapolado adequadamente, à medida em que se define os módulos funcionais apropriados e as correspondentes macros.

Em relação ao projeto dos programas que tratam a ocorrência de eventos indesejáveis e/ou aleatórios correspondentes às situações de operação manual, interrupções por chaveamento do modo de operação, falhas e paradas de emergência, devem ser projetados necessariamente como módulos funcionais, contornando-se o problema de complexidade de tratamento de todas as possíveis possibilidades agregando-se intertravamentos adequados à operação do sistema.

Os programas desenvolvidos em linguagens de controle apropriadas, como o SFC, diagramas de relés e o E-MFG podem ser carregados diretamente no dispositivos de realização de controle programáveis (CP) ou em tradutores intermediários para posterior carregamento nos CP. Em SANTOS FILHO; MIYAGI [1997] é proposta uma ferramenta de tradução automática de grafos MFG para STEP-5 uma linguagem padrão de programação de controladores lógicos programáveis da empresa Siemens.

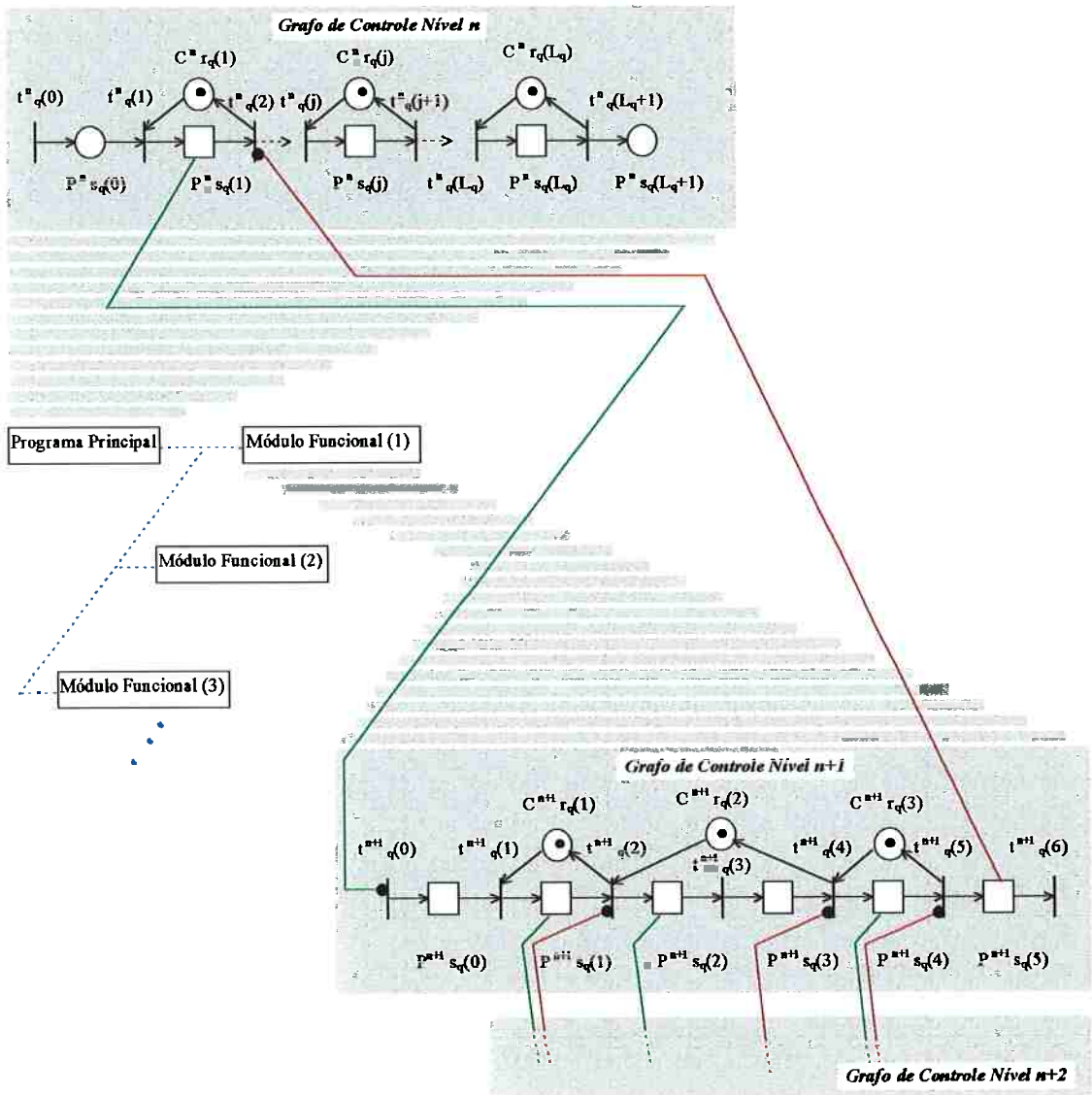


Fig. 6.8 Relação entre a estrutura do programa e o grafo PFS-R/E-MFG de controle

### 6.6 ETAPA DE VALIDAÇÃO E TESTES

A validação do sistema de controle desenvolvido é realizada a partir do processamento do programa de controle em um dispositivo de realização do controle adequado e da verificação se as expectativas dos clientes e usuários foram satisfeitas.

Considerando-se a hipótese de existir um simulador E-MFG, a função de simulação durante a etapa de projeto constitui-se em um fator fundamental. Aplicando-se a metodologia PFS-R/E-MFG para a modelagem de todas as partes do sistema conforme ilustra a Fig. 6.9 obtêm-se:

- Método ágil de validação que facilita a detecção de falhas durante a fase de desenvolvimento do projeto.
- Maximização da qualidade dos ‘softwares’ desenvolvidos (estrutura e funcionamento das partes) durante a evolução do projeto.
- Desenvolvimento de ‘softwares’ para dispositivos de realização do controle segundo critérios de prototipagem rápida.

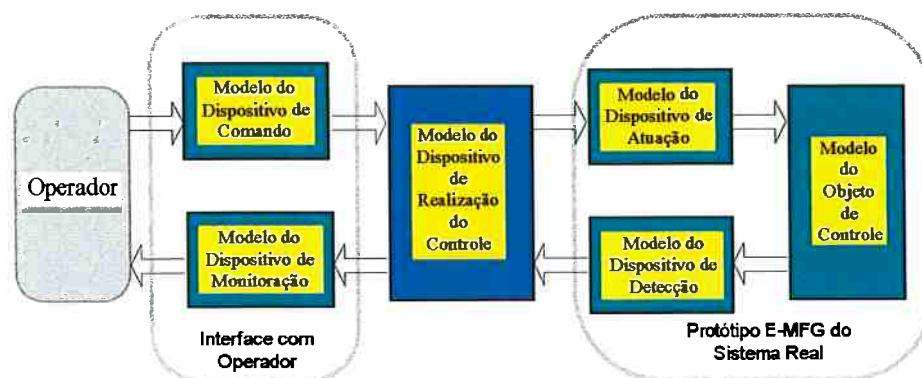


Fig. 6.9 Partes do modelo global de sistema produtivo

Na Fig. 6.9 supõe-se que exista um simulador com interface gráfica para editar os grafos PFS-R/E-MFG de cada uma das partes do sistema. Entre as partes, a comunicação é

realizada através de arcos de sinal de saída e portas habilitadoras e/ou inibidoras, definido anteriormente como fluxo vertical de informações. Desta forma, mantém-se uma consistência lógica entre o modelo global e o sistema real que facilita a interpretação e análise do mesmo, principalmente no caso de existirem possíveis falhas a serem corrigidas além de evitar ‘deadlocks’ devido a intrusão e vazamento de marcas.

Dependo dos recursos do simulador é possível o operador interagir com o ambiente de simulação ampliando o poder de análise do sistema já que existe a possibilidade de modelar-se os dispositivos de comando e monitoração em E-MFG.

A consideração das características do objeto de controle permite ainda realizar um outro tipo de análise:

- Verificar a sensibilidade do sistema em relação a diferentes estratégias de controle, permitindo inclusive a realização de medidas de desempenho uma vez que existem elementos temporizados no grafo E-MFG.
- Verificar o desempenho do sistema para diferentes cenários, em que se varia os recursos disponíveis.

No caso dos SAPs que possuem um sistema de transporte baseado em VTs a versatilidade de analisar-se o comportamento do sistema quando se varia o número de VTs disponíveis é fundamental, inclusive para dimensionar-se o número adequado de transportadores necessários.

Considerando as técnicas de controle descritas no Capítulo 5, uma série de simulações podem ser realizadas variando-se o número de VTs disponíveis. A partir dos resultados obtidos é possível estimar-se em uma primeira instância o número de transportadores



adequado para atender a demanda de transporte do sistema e em segundo lugar, verificar o impacto na evolução da dinâmica do sistema quando ocorrem alterações súbitas no número de transportadores ativos. Uma vez que o sistema de controle é reativo, é importante conhecer até que ponto é tolerável variar-se dinamicamente o número de transportadores sem que afete drasticamente o desempenho do sistema, servindo inclusive como diretriz para programar-se turnos de manutenção destes transportadores.

Neste contexto, verifica-se como estas técnicas de desenvolvimento e controle de SAPs permitem uma forte participação do elemento humano durante todas as fases do ciclo de vida do sistema de controle.

## **6.7 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES**

Neste Capítulo apresentou-se inicialmente um particionamento para modelar-se concretamente o comportamento dinâmico de um SAP, correspondendo a uma diretriz preliminar para orientar a realização das várias atividades que compõem os procedimentos de projeto do sistema de controle. Baseado nestes fatos, considera-se três partes fundamentais a serem modeladas:

- Parte correspondente ao objeto de controle.
- Parte correspondente ao conjunto de processos.
- Parte correspondente aos transportadores autônomos para rotas genéricas.

A seguir, foram apresentadas as atividades básicas de cada etapa e os procedimentos adicionais que devem ser agregados a cada uma delas para tornar a tarefa de desenvolvimento de sistemas de controle de SAPs mais eficiente.

Uma vez que o E-MFG é uma rede interpretada, que possui elementos estruturais que permitem um perfeito interfaceamento com elementos externos, mostra-se plenamente adequada consideração do elemento humano como gerador de eventos assíncronos capaz de interagir efetivamente com a evolução dinâmico do SAP.

# CAPÍTULO 7

## OBSERVAÇÕES FINAIS

Motivado pelo problema das empresas no sentido de manterem-se competitivas frente a uma realidade de globalização da economia e conseqüentemente de mercados, neste trabalho é proposta a aplicação de uma abordagem baseada em sistemas antropocêntricos para contribuir nos estudos dos procedimentos básicos para o projeto de sistemas de controle de sistemas de produção. Desta forma, é apresentada uma solução consistente para estes sistemas adequarem-se aos novos padrões de autonomia, flexibilidade e qualidade num contexto que exige uma completa reestruturação organizacional em que os consumidores buscam uma crescente variabilidade de produtos.

Neste contexto, inicialmente é apresentado o conceito de sistemas antropocêntricos e tecnocêntricos estabelecendo-se uma comparação entre as principais características de cada uma das abordagens. Considerando-se os aspectos levantados, é introduzida a definição genérica de sistema antropocêntrico de produção (SAP), estabelecendo-se as principais características do comportamento dinâmico apresentado por estes sistemas e definindo-se um conjunto de características essenciais que devem fazer parte do conjunto de propriedades de uma ferramenta capaz de tratar estes sistemas.

Desta forma, é apresentado o E-MFG como uma extensão do MFG em que se considera marcas individuais no grafo e uma hierarquia no processo de disparo das transições, incrementando-se assim o poder de modelagem do grafo. No sentido de sistematizar e racionalizar a tarefa de construção dos grafos E-MFG é apresentado o PFS e o PFS-R (para explicitar a alocação de recursos) como ferramentas adequadas para aplicar uma abordagem 'top-down' para a modelagem de sistemas complexos. Sendo assim, apresentou-se um conjunto de procedimentos adequados para modelar a funcionalidade de SAPs, considerando inicialmente apenas o modelo do objeto de controle gerando-se modelos híbridos PFS-R/E-MFG.

Uma vez definida a funcionalidade do objeto de controle, o próximo passo considerado foi a definição do que se deseja realizar, isto é, especificar as estratégias de controle visando a execução de determinados processos.

Neste sentido foi realizado inicialmente um estudo comparativo das várias arquiteturas básicas existentes para o controle de sistemas produtivos, estabelecendo-se um paralelo em termos das características fundamentais de cada forma de controle: centralizada, hierárquica, hierárquica modificada e distribuída.

Para o projeto de sistemas de controle de SAPs, o E-MFG é utilizado como ferramenta básica para a modelagem da parte correspondente ao controle destes sistemas, detalhando-se inclusive a modelagem das funções elementares de controle de tarefas e considerando a representação dos intertravamentos fundamentais nestes grafos. Quanto ao procedimento de especificação do controle em E-MFG dos vários processos executados em um sistema produtivo, foi apresentada uma descrição formal dos

processos, definindo-se uma seqüência de produção para cada produto em que a execução de cada etapa implica em alocar-se um único recurso.

Para explorar a capacidade de modelagem do E-MFG em modelar estratégias de controle, foi introduzida a metodologia PFS-R/E-MFG para a modelagem dos elementos atividade, distribuidor e alocação de recursos, abordando aspectos pertinentes à distribuição do controle em vários níveis, ao fluxo “vertical” de informações de controle e o tratamento de macros para estabelecer um grafo livre de contato e que atenda às especificações funcionais do SAP.

Em relação ao controle do fluxo de materiais, foi apresentada uma caracterização de ‘deadlock’ em SAPs, identificando-se claramente as condições necessárias relacionadas à ocorrência do travamento do sistema devido a um controle inadequado do fluxo de itens que integra as diversas estações de trabalho de um SAP para a realização de um determinado conjunto de processos. Sendo assim, foi aplicada uma técnica de modelagem dos SAPs através de grafos de alocação e requisição de recursos (GAR) onde se definiu os conceitos de segmento e ciclo fechado (CFE).

No sentido de eliminar-se o ‘deadlock’ foi proposto um procedimento que se utiliza do modelo GAR para identificar os CFEs presentes no sistema sendo que, a partir da análise destes ciclos, determina-se um conjunto de PAIs (pares alocação-recurso de intersecção) adequados para serem compensados. Como resultado, obtém-se um conjunto mínimo de elementos compensadores adequados para eliminar-se o ‘deadlock’ do sistema e que são incorporados sistematicamente nos modelos E-MFG para o controle do SAP.

No sentido de estender-se o conceito de SAPs introduzido neste trabalho, é colocado em prática os princípios de uma abordagem antropocêntrica para a solução do problema de

controlar-se o fluxo de veículos de transporte em um SAP, considerando veículos dirigidos por motoristas, agregando-se o conceito de reatividade em que se considera o elemento humano como gerador de eventos capaz de comandar esta reatividade.

Neste sistema de controle reativo os parâmetros de entrada para a realização do controle são os índices de demanda média de transporte  $D_{mi}$  de cada estação de carga/descarga  $E_i$  e as requisições de transporte que se propagam durante a evolução dinâmica do SAP. Como saída, o sistema de controle aloca os VTs para executarem as pendências de transporte.

A estratégia de controle adotada baseia-se em particionar o sistema em regiões produtivas de maneira que existe uma homogeneidade em termos de quantidade de trabalho de transporte por área delimitada, associando-se um único VT por região.

Em relação às regiões, foi determinado um ponto estratégico adequado para o estacionamento do VT em cada uma delas: o CVDR - centro virtual de demanda regional. Para manter os VTs nestas regiões foram propostos algoritmos de controle que buscam uma solução ótima para alocá-los de acordo com as requisições de transporte pendentes.

Sempre que existir uma alteração nas condições do sistema no que se refere à interação do sistema produtivo com o meio ou se ocorrer uma variação repentina e significativa nos níveis de demanda  $D_{mi}$ , o sistema de controle reage realizando um novo particionamento da planta em regiões e adaptando o controle do transporte às novas condições de volume de trabalho.

O mesmo procedimento ocorre se existir uma variação no número de VTs ativos para atender o sistema. Estas decisões são tomadas pelo operador que possui o conhecimento adequado da dinâmica do sistema.

Desta forma, foi apresentada uma aplicação dos princípios de sistemas antropocêntricos para tratar o problema de controlar um sistema de transporte de VTs em um SAP e que exemplifica o interfaceamento do sistema de controle com o operador para que este possa interagir efetivamente com o sistema de controle e interferir na evolução dinâmica deste, resultando em uma proposta de arquitetura de SAP reativo.

Para concluir este trabalho foi descrito um conjunto de procedimentos que direcionam o projeto de sistemas de controle de SAPs, correspondendo a uma extensão à metodologia proposta em MIYAGI [1996]. Neste sentido, foram analisadas as várias atividades relativas a cada uma das etapas de projeto e sempre que for necessário foram adicionados procedimentos para especificar adequadamente o comportamento dinâmico e a estrutura dos sistemas produtivos desta natureza. Estes procedimentos adicionais visam introduzir as várias técnicas de modelagem e controle propostas ao longo deste trabalho para projetar efetivamente sistemas de controle de SAPs, destacando-se as interfaces com o elemento humano e sua participação nas tomadas de decisões e evolução do comportamento dinâmico do sistema durante todo o ciclo de vida do mesmo.

## 7.1 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

O resultado do desenvolvimento deste estudo traduz-se nas seguintes contribuições fundamentais:

- Introdução de Sistemas Antropocêntricos de Produção como um conceito que valoriza o elemento humano fomentando técnicas para aprimorar a sua integração na dinâmica do sistema produtivo como um elemento ativo gerador de eventos capaz de atuar nas diversas partes do sistema:
  - a) definição do algoritmo de controle;
  - b) comando e monitoração dos dispositivos de realização do controle e;
  - c) interação com o objeto de controle a nível de operações de chão de fábrica.
- Extensão da metodologia PFS/MFG para o caso em que se deseja utilizar uma representação explícita de recursos e/ou marcas individualizadas para intensificar o fluxo de informações de controle, resultando na metodologia PFS-R/E-MFG.
- Adaptação de uma descrição formal de processos definida inicialmente para RdP L/T, para o E-MFG analisando-se o problema de utilizar-se macros.
- Proposta de um procedimento para obtenção de um conjunto mínimo de compensadores a partir da análise de grafos alocação-recurso (GAR) a serem agregados ao grafo de controle E-MFG para eliminar o 'deadlock' causado pelo fluxo de materiais em SAPs.



- Aplicação dos princípios de sistemas antropocêntricos para o controle de sistemas de transporte baseado em VTs resultando em uma arquitetura de SAP reativo.
- Proposta de um conjunto de procedimentos que foram inseridos à metodologia de projeto de sistemas de eventos discretos proposta em MIYAGI [1996] resultando em uma extensão, adequada para tratar-se SAPs reativos.

## 7.2 TRABALHOS FUTUROS

Em relação à metodologia PFS-R/E-MFG

- Estudar a aplicação da metodologia para a modelagem de SAPs no sentido de explorar a capacidade desta técnica ser utilizada em estudos de caso diversos.
- Desenvolver simuladores baseados em E-MFG e PFS-R para a análise destes modelos e validação.
- Desenvolver controladores do tipo supervisórios baseado nestas técnicas para compor um ambiente completo de desenvolvimento de sistemas de controle de SAPs.
- Implementar tradutores de E-MFG para linguagens usuais de programação de controladores programáveis existentes no mercado, a exemplo do que ocorre com o SFC e GRAFCET.

Em relação a técnicas para evitar-se o ‘deadlock’ em sistemas produtivos.

- Realizar pesquisas no sentido de tornar mais eficiente o método de determinação dos pontos de intersecção dos ciclos fechados existente em um grafo alocação-recurso para o caso em que o sistema de produção é de porte elevado, envolvendo grafos de maior complexidade, otimizando assim o processo de obtenção dos pares de alocação de intersecção.

Em relação ao SAP reativo:

- Estender o conceito de reatividade para todo o sistema e não apenas para a parte de controle do sistema de transporte.

Em relação à metodologia de projeto de SAPs:

- Aplicar a metodologia para vários estudos de caso no sentido de validar e aprimorar os procedimentos propostos.

### 7.3 TRABALHOS PUBLICADOS

A seguir lista-se os trabalhos publicados que envolvem as pesquisas realizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

- Linguagem de Programação para Sistema de Manufatura Baseada em Redes de Petri. In: 1º SAI Simpósio de Automação Integrada. **Anais**. SBA/CEFET-PR, Curitiba, PR, p.130-134, 1990.

- Ferramentas para Projetos e Análise de Sistemas Integrados de Manufaturas. In: 4º CONAI - Congresso Nacional de Automação Industrial. **Anais.** ABCPAI/SUCESU, São Paulo, SP, p.174-183,1990.
- Sistemas de Eventos Discretos e seu Controle. In: 1º CINISA - Congresso Internacional da ISA - Região América do Sul (Evento conjunto com o 1º COBISA). **Anais.** ISA International, São Paulo, SP, p.2.1-12, 05/1991.
- Specification of Task Control for Production Systems. In: International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems. **Proceedings.** IMACS/SICE, Kobe, Japão, p.1505-1510, 1992.
- Analysis of Integrated Manufacturing Systems Based on MFG/PFS Methodology. **Robótica e Automação,** Lisboa, Portugal, n.10, p.19-24, 1992.
- Controle de Tarefas de um Sistema de Transporte por Veículos Autônomos - Aplicação da Técnica de MFG/PFS em Sistemas Integrados de Manufatura. In: 9º CBA - Congresso Brasileiro de Automática. **Anais.** SBA, Vitória, ES, p.958-963, 1992.
- Proposta do MFG Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas Integrados de Manufatura. In: XII COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. **Anais.** ABCM, Brasília, DF, v.1, p.293-296, 1993.
- Mark Flow Graph e suas Extensões para Análise e Controle de Sistemas de Manufatura. In: XII COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. **Anais.** ABCM, Brasília, DF, v.1, p.297-300, 1993.
- Solução de Conflitos em Sistemas Integrados de Manufatura Através de Regras Associadas à Metodologia MFG/PFS. In: XII COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. **Anais.** ABCM, Brasília, DF, v.1, p.357-360, 1993.
- Proposta do MARK FLOW GRAPH Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas Integrados de Manufatura Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 1993.

- Realização de Controle de Tarefas de Veículos Autônomos de Transporte Através do MFG Estendido com Marcas Individuais. In: 6° CONAI - Congresso Nacional de Automação Industrial. **Anais**. SUCESU-SP/Automática, São Paulo, SP, 1994.
- Enhanced Mark Flow Graph to Control Autonomous Guided Vehicle. In: CAPE'95 Computer Applications in Production Engineering. **Proceedings**. IFIP, Beijing, China, p.856-865, 1995.
- The Application of Enhanced Mark Flow Graph in Real Time Control Systems. In: IFAC 4th Symposium on Low Cost Automation. **Preprints**. IFAC/AADECA, Buenos Aires, Argentina, p.163-170, 1995.
- Enhanced Mark Flow Graph to Control Flexible Manufacturing Systems. **Jornal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences**, ABCM, Rio de Janeiro, RJ, v.17, n.2, p.232-248, 1995.
- A Design Methodology of Control Systems for Industrial Applications Based on Petri Nets. In: MECHATRONICS'96 the 5<sup>th</sup> UK Mechatronics Forum International Conference and M2VIP'96 the 3<sup>rd</sup> International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice. **Proceedings**. IEE/IMEchE, Guimarães, Portugal, v.1, p.385-390, 09/1996.
- Proposta de uma Ferramenta Computacional para Análise de Grafos E-MFG por Simulação. In: 11° CBA - Congresso Brasileiro de Automática. **Anais**. SBA, São Paulo, SP, v.II, p.689-694, 09/1996.
- Projeto de Sistemas de Controle Programável. In: IV INFTEL Congresso de Informática e Telecomunicações. **Anais**. Petrobrás/USP, São Paulo, SP, 12/1997.
- Proposta de uma Ferramenta Automática de Programação de CPs a Partir de Modelos MFG. In XIV COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. **Anais**. CDROM. ABCM, Bauru, SP, 12/1997

- Automação de um Sistema de Rampa para Embarque e Desembarque de Veículos em Navios. In XIV COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. *Anais*. CD-ROM. ABCM, Bauru, SP, 12/1997.
- Modelagem e Análise de Sistemas Complexos com Recursos Compartilhados Através do PFS (Production Flow Schema). *Anais*. XI CBA - Congresso Brasileiro de Automática, SBA, Uberlândia, 1998. (Submetido)

## ANEXO A

### EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PFS/MFG

Como um exemplo de aplicação da metodologia PFS/MFG, apresenta-se a seguir a especificação do controle de um sistema de rampa de acesso a navios, que é parte de um projeto da Marinha do Brasil, relacionado com a modernização de seus equipamentos.

Quando não existe infra-estrutura portuária especial, a forma mais comum de se realizar o acesso de veículos a navios é através de um sistema de rampa. Esta rampa é estendida pela proa do navio até a terra propriamente dita. No sistema considerado, a extensão ou retração da rampa é realizada por intermédio de cabos de aço presos à rampa. Estes cabos passam por guindastes situados na proa do navio e por um conjunto de roldanas sendo, então, enrolados em carretéis. A cada um dos carretéis está acoplado um motor por meio de engrenagens, constituindo um conjunto denominado guincho. Existem portanto 3 guinchos, sendo que cada um deles desempenha uma função específica (Fig. A.1):

- Guincho de entrada: executa a função de retrain a rampa,
- Guincho de saída: executa a função de estender a rampa,
- Guincho de içamento: executa a função de sustentar a rampa.

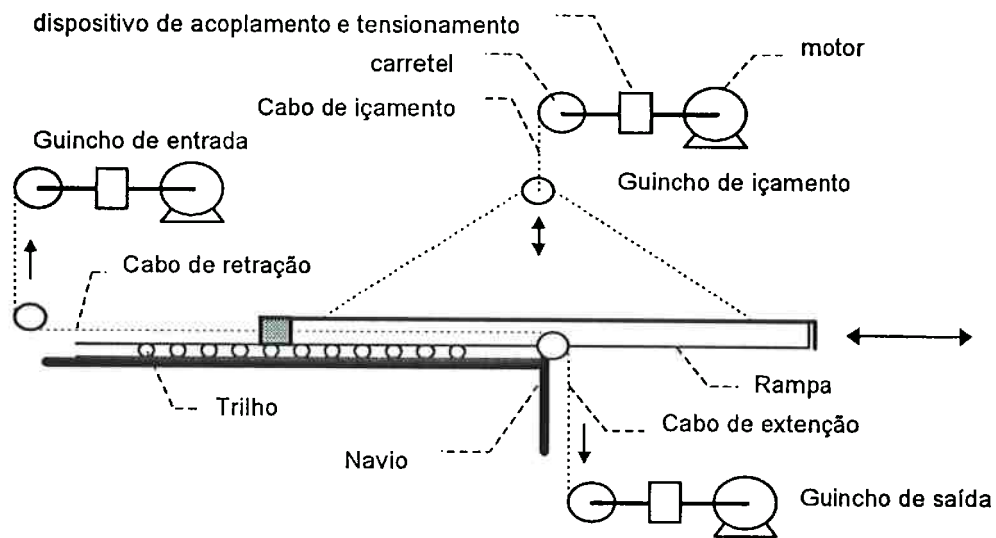


Fig. A.1 Modelo esquemático da rampa e dos guinchos

Cilindros de tensionamento (um em cada guincho) que são, na verdade, cilindros hidráulico-pneumáticos têm a função de promover o tensionamento perfeito dos cabos. Existem sensores estrategicamente posicionados ao longo do curso dos cilindros e que indicam os níveis de tensão. A tensão adequada é obtida através da atuação nos guinchos que irão entrar e soltar os cabos de aço fazendo com que os cilindros de tensionamento deslizem ao longo de seu curso. Afim de permitir o apoio necessário para o deslizamento e posicionamento correto da rampa por ocasião de sua operação, existem trilhos na estrutura do navio e roletes de suporte e roletes guia situados na rampa. O posicionamento e sentamento da rampa é feito por um dispositivo denominado dispositivo de sentamento (Fig. A.2).

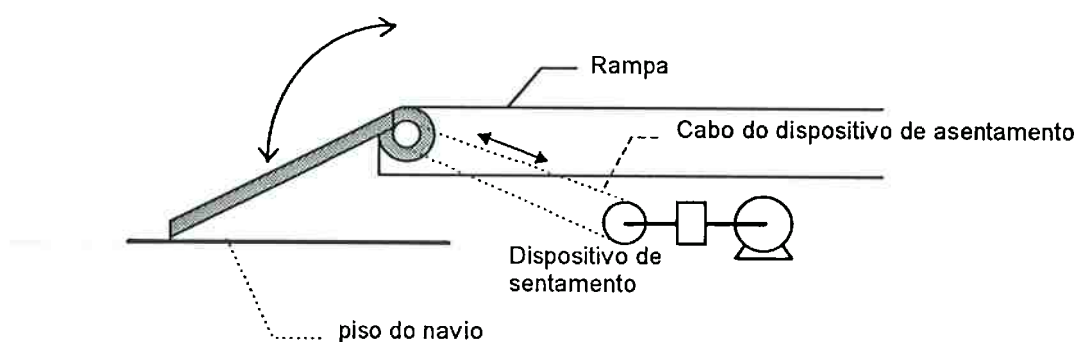


Fig. A.2 Modelo esquemático do dispositivo de sentamento da rampa

Para representar as seqüências de extensão e retração da rampa de proa o fluxo de itens é abstraído por um fluxo de *pacotes de operações*. Baseado neste conceito, os processos de extensão e retração da rampa são caracterizados por inter-relacionamentos entre atividades e condições, devido a natureza discreta deste inter-relacionamentos.

A Fig. A.3 ilustra o Modelo PFS que descreve as seqüências de retração e extensão da rampa. A partir deste modelo realizou-se refinamentos sucessivos até atingir-se um nível de detalhamento adequado para realizar o controle do sistema.



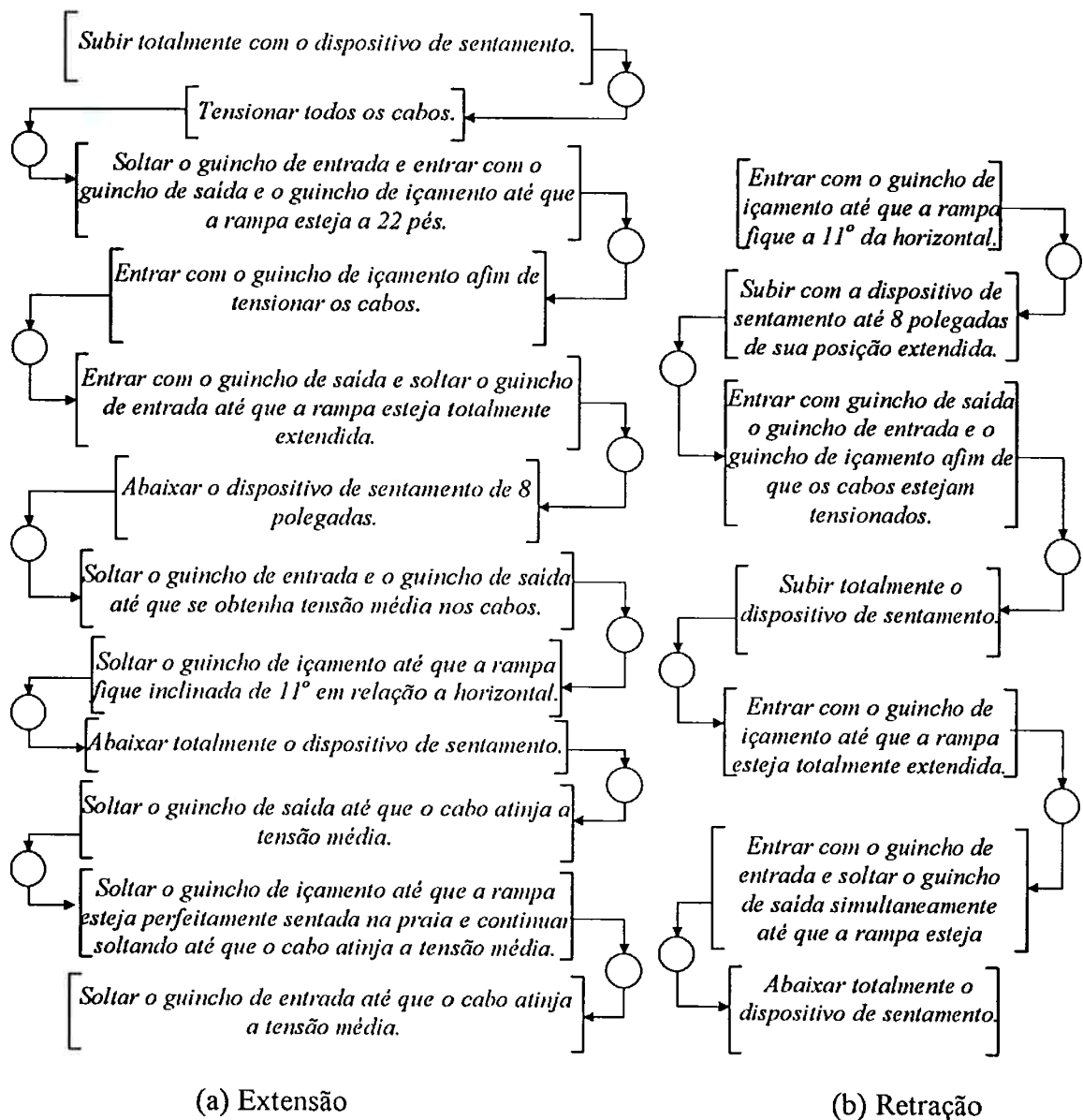


Fig. A.3 Seqüências de extensão e retração da rampa

Todos os módulos foram desenvolvidos utilizando este procedimento. Baseado nestes conceitos, gerou-se os modelos necessários, onde sincronizou-se o modelo do controle ao modelo do objeto de controle através da inclusão dos estados dos dispositivos de

interfaceamento internos (atuação e detecção) e externos (comando e monitoração)<sup>1</sup>. A Fig. A.4 ilustra este procedimento para o caso em que a atividade “*Subir totalmente com o dispositivo de sentamento*” foi detalhada.

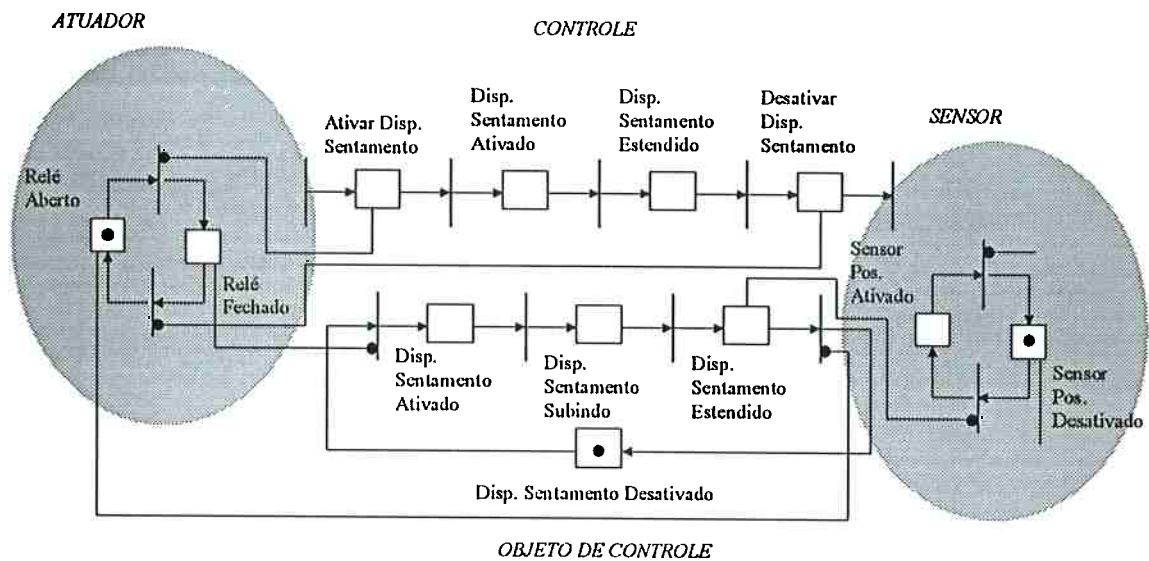


Fig. A.4 Detalhamento da Atividade “*Subir totalmente ... dispositivo de sentamento*”

<sup>1</sup> O capítulo 3 apresenta em detalhes os aspectos pertinentes à modelagem da parte de controle e sua conexão e troca de informações com o objeto de controle.

## ANEXO B

### PROBLEMAS DE DESIGNAÇÃO

Originalmente, os problemas de designação envolvem a alocação biunívoca de operários a tarefas (envolvendo, mais comumente, a permutação de um conjunto de objetos). Por hipótese, o número de operários deve ser igual ao de tarefas, caso contrário, devem ser criados elementos fictícios adequadamente para que esta hipótese seja obedecida. O objetivo é designar cada um dos operários para cada uma das tarefas de maneira que sejam concluídas em um tempo total mínimo (BRONSON [1985]).

Os problemas de designação assim definidos podem ser convertidos em problemas de transporte, considerando-se os operários como *origens* e as tarefas como *destinos* de maneira que, se no modelo de movimentação de itens forem introduzidas as restrições:

- a) número de origens = número de destinos ( $m = n$ );
- b) capacidade de cada origem = 1 ( $a_i = 1$  para todo  $i$ );
- c) demanda de cada destino = 1 ( $b_j = 1$  para todo  $j$ );

Obter-se-á o modelo de designação que tem o seguinte aspecto:

$$\text{Mín. } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad \text{sujeito a} \quad \left[ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (j=1,2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i=1,2, \dots, n) \\ \text{e } x_{ij} \geq 0 \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (j=1,2, \dots, n). \end{array} \right. \quad (\text{B.1})$$

É claro que apenas uma origem  $i$  abastecerá um único destino  $j$ , de modo que as últimas restrições do modelo (B.1) são equivalentes a:

- $x_{ij} = 1$  se a origem  $i$  for designada para abastecer o destino  $j$
- $x_{ij} = 0$  caso contrário.

O problema consiste em determinar-se como as designações devem ser realizadas de modo a minimizar o custo total.

O modelo de transporte, pelas suas características particulares, admite um algoritmo especial para a obtenção da sua solução ótima. O modelo da designação, sendo um caso especial do modelo de movimentação de itens, admite também um algoritmo particular para a sua otimização.

Como as capacidades de cada origem e as demandas de cada destino são unitárias, o algoritmo da designação será baseado apenas na seguinte matriz:

$$\begin{array}{c} \text{Origens} \\ \left[ \begin{array}{cccc} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{n2} \end{array} \right] \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{Destinos} \\ \\ \\ \\ \end{array} \quad (\text{B.2})$$

O processo iterativo que conduz à solução ótima baseia-se no seguinte teorema:

**Teorema B.1.** Ao se adicionar uma constante a cada elemento de uma linha (coluna) qualquer da matriz de eficiência de um problema de designação, a solução ótima da matriz alterada será também a solução ótima da matriz inicial.

Seja  $k_i$  a constante somada a cada elemento da linha  $i$  ( $i=1,2, \dots, n$ ). Tem-se, então,

$$\begin{aligned} Z_k &= \sum_{j=1}^n (c_{1j} + k_1)x_{1j} + \sum_{j=1}^n (c_{2j} + k_2)x_{2j} + \dots + \sum_{j=1}^n (c_{nj} + k_n)x_{nj} \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} + k_1 \sum_{j=1}^n x_{1j} + k_2 \sum_{j=1}^n x_{2j} + \dots + k_n \sum_{j=1}^n x_{nj} \end{aligned}$$

$$\text{como} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{2j} = \dots = \sum_{j=1}^n x_{nj} = 1 \quad \text{vem}$$

$$Z_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^n k_i$$

e, finalmente,

$$Z_k = Z + \sum_{i=1}^n k_i \quad (\text{B.3})$$

O processo consistirá em se obter uma matriz de eficiência alterada que seja “equivalente” à original, não possuindo nenhum elemento negativo, e apresentando o maior número possível de elementos nulos, de maneira que a solução ótima seja aparente e de valor  $Z_k^*=0$ .

Pela relação (B.3) conclui-se que o valor absoluto de  $Z^*$  será igual à soma das constantes que foram utilizadas na transformação da matriz eficiência.

### **Algoritmo da Designação**

De maneira a se obter a designação de custo mínimo, as seguintes operações devem ser realizadas na matriz de eficiência (B.2):

- i) Subtrair o elemento mínimo de cada linha de todos os elementos daquela linha.  
Fazer o mesmo para as colunas.
- ii) Examinar as linhas e colunas sucessivamente. Para cada linha (coluna) com exatamente um zero restante, reserve (indicar por  $\square$ ) àquela posição para uma designação, e elimine (indicar por X) os outros zeros da coluna (linha) correspondente. Repetir, se necessário, para as linhas e colunas sem posições reservadas até que todos os zeros tenham sido reservados ou eliminados. Se as posições reservadas completam as designações a solução é ótima. Caso contrário, seguir para o passo iii.
- iii) Traçar um número mínimo de retas para cobrir todos os zeros, da seguinte maneira:
  - a) Marcar todas as linhas que não tenham designações.

- b) Marcar todas as colunas que tenham zeros em linhas marcadas.
  - c) Marcar todas as linhas que tenham designações em colunas marcadas.
  - d) Repetir os passos b) e c) até não ser mais possível marcar linhas ou colunas.
  - e) Traçar uma reta sobre cada linha não marcada e sobre cada coluna marcada.
- iv) Examinar todos os elementos não cobertos por uma reta. Escolher o elemento mínimo desses elementos e subtraí-lo de todos os elementos não cobertos por uma reta. Somar esse elemento mínimo a cada elemento situado na interseção de duas retas. Retornar ao passo ii.

## ANEXO- C

# EXEMPLO DO PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO DE VTs

Neste Anexo apresenta-se um exemplo dos dados pertinentes aos ensaios realizados no sentido de aplicar-se a metodologia PFS-R/E-MFG para a modelagem, análise e controle de sistemas de transporte que integram um sistema de produção. O estudo de caso corresponde ao sistema apresentado no Capítulo 5, isto é, uma instalação industrial de manufatura de porte relativamente grande (planta industrial instalada na Grande São Paulo). Esta planta com cerca de 900.000m<sup>2</sup> envolve 6 transportadores e cerca de 90 carretas para a realização do transporte de itens através de 54 estações de carga/descarga no sistema.

Para a coleta de dados pertinentes ao tráfego de transportadores na fábrica, optou-se por registrar vários turnos de trabalho objetivando medir-se a frequência de visitas destes transportadores às estações de trabalho. Os dados coletados encontram-se organizados nas Tabelas C.1 a C.9 correspondentes aos pares *origem-destino* visitados periodicamente por cada um dos transportadores, isto é, cada um destes veículos assumiam o volume de trabalho correspondente ao transporte de itens de um conjunto pré-determinado de estações de trabalho.



Tabela C.1 Fluxo de transporte realizado pelo transportador A.

ORIG.	DEST.	FREQ.	TRANSPORTANDO ...
2	5	5	Leva carreta cheia (3 carretas) e espera descarregar
	45	6	Vai sem carreta
5	2	3	Leva carreta vazia
	16	4	Vai sem carreta pegar sucata
	37	1/sem.	Leva carreta com serragem
7	2	4	Vai sem carreta
	13	3	Leva carreta vazia
13	7	2	Leva carreta cheia
	16	1/sem.	Leva carreta cheia de serragem
	31	2	Vai sem carreta
	53	3	Vai sem carreta buscar carreta vazia na sucata
14	45	4	Leva carreta vazia 20% das vezes
	45	2	Vai se carreta 80% das vezes
16	5	1/sem.	Leva serragem (1x/semana)
	31	3	Leva carreta cheia
	45	5	Vai sem carreta
	53	7	Leva carreta cheia para sucata e espera descarregar
20	48	2	Leva carreta cheia e espera descarregar
31	16	2	Leva carreta cheia
37	13	1/sem.	Leva carreta vazia
45	7	3	Vai sem carreta
	13	3	Vai sem carreta
	14	2	Leva carreta cheia com aço
	16	5	Leva carreta cheia
	20	4	Leva carreta cheia
	48	1	Leva carreta cheia com aço
	53	2	Leva carreta cheia de sucata
	48	20	2
45	3	Leva carreta vazia que esperou descarregar	
53	13	3	Vai sem carreta em 20% das vezes
	16	2	Leva carreta cheia de embalagens vazias
	45	3	Leva carreta cheia de embalagens vazias

Tabela C.2 Fluxo de transporte realizado pelo transportador B.

ORIG.	DEST.	FREQ.	TRANSPORTANDO ...
1	6	1	Leva carreta vazia
	9	4	Vai sem carreta
	11	2	Vai sem carreta
	12	1	Leva carreta vazia 40% das vezes
	12	3	Vai sem carreta 60% das vezes
	21	6	Vai sem carreta
	42	1	Leva carreta cheia
	43	1	Leva carreta cheia
2	9	4	Vai sem carreta
	10	4	Vai sem carreta
	12	4	Vai sem carreta
	21	4	Vai sem carreta
	43	2	Leva carreta cheia
3	4	3	Vai sem carreta
	10	3	Vai sem carreta
	12	3	Vai sem carreta
	21	3	Vai sem carreta
	50	3	Vai sem carreta
4	6	1	Leva carreta vazia
	12	1	Leva carreta semi cheia para completar (cheia)
	41	1	Leva carreta cheia
	43	2	Leva carreta cheia
	50	1	Leva carreta vazia
6	43	2	Leva carreta cheia
	50	3	Leva carreta cheia
8	50	2	Leva carreta vazia
9	1	2	Vai sem carreta
	6	4	Vai sem carreta
	10	4	Vai sem carreta
	12	6	Leva carreta cheia
	21	6	Vai sem carreta
10	12	1	Leva carreta vazia
	21	5	Vai sem carreta 80% das vezes
	21	2	Leva carreta cheia 20% das vezes
	38	2	Leva carreta cheia
	50	1/sem.	Leva carreta cheia
11	1	1	Vai sem carreta
	2	2	Vai sem carreta
	4	2	Vai sem carreta
	6	2/sem.	Leva carreta vazia 20% das vezes
	9	4	Vai sem carreta
	10	5	Vai sem carreta
	21	5	Vai sem carreta
	50	6	Leva carreta cheia de embalagens

Tabela C.3 Fluxo de transporte realizado pelo transportador B (continuação).

ORIG.	DEST.	FREQ.	TRANSPORTANDO ...
12	3	1	Leva carreta cheia
	4	3	Leva carreta semi cheia para completar
	6	2	Leva carreta vazia
	9	10	Leva carreta cheia de embalagens
	41	1	Leva carreta cheia
	42	1	Leva carreta cheia
	43	5	Leva carreta cheia
	50	3	Leva carreta vazia
21	2	2/sem.	Leva carreta vazia
	4	1	Leva carreta cheia 20% das vezes
	4	4	Vai sem carreta 80% das vezes
	6	1	Leva carreta vazia
	10	1/sem.	Leva carreta cheia
	11	1	Leva carreta cheia
	12	2	Leva carreta vazia
	38	3	Leva carreta cheia
	42	1	Leva carreta cheia
	43	3	Leva carreta cheia com 2 tipos de materiais e espera descarregar
	48	3/sem.	Leva carreta cheia
50	3/sem.	Leva carreta cheia	
33	50	1/15 dias	Leva carreta cheia
38	10	1	Leva carreta vazia
	21	2	Leva carreta vazia
41	4	1	Leva carreta vazia
	12	1	Leva carreta vazia
	38	2	Vai sem carreta
	42	2	Vai sem carreta
	43	2	Vai sem carreta
	48	1	Leva carreta vazia
	50	3	Vai sem carreta
42	1	1	Leva carreta vazia
	12	1	Leva carreta vazia
	21	1	Leva carreta vazia
43	1	1	Leva carreta vazia
	4	3	Leva carreta vazia
	10	2	Leva carreta vazia
	12	3	Leva carreta vazia
	21	2	Leva carreta vazia
	50	1	Leva carreta vazia
48	21	1	Leva carreta vazia

Tabela C.4 Fluxo de transporte realizado pelo transportador B (continuação).

ORIG.	DEST.	FREQ.	TRANSPORTANDO ...
50	3	1	Leva carreta cheia
	4	1	Leva carreta cheia
	8	1/sem.	Leva carreta cheia
	9	1	Leva carreta cheia
	10	1	Leva carreta cheia 20% das vezes
	10	3	Vai sem carreta 80% das vezes
	11	1	Leva carreta cheia 10% das vezes
	11	1	Vai sem carreta 90% das vezes
	33	1/15dias	Leva carreta vazia
	43	1	Leva carreta cheia
	54	2/sem.	Leva carreta vazia
	54	50	2/sem.

Tabela C.5 Fluxo de transporte realizado pelo transportador C.

ORIG.	DEST.	FREQ.	TRANSPORTANDO ...
21	30	3	Vai sem carreta
	46	1	Leva carreta cheia
24	30	2	Leva carreta cheia
25	21	1	Vai sem carreta
	24	2	Vai sem carreta
	24	2	Leva carreta vazia
	30	3	Leva carreta cheia
	44	1	Vai sem carreta
	46	2	Vai sem carreta
30	24	3	Leva carreta vazia
	25	2	Leva carreta cheia
	44	2	Leva carreta vazia
44	21	1	Vai sem carreta
	30	1	Leva carreta cheia
46	21	1	Leva carreta cheia
	25	1	Vai sem carreta

Tabela C.6 Fluxo de transporte realizado pelo transportador D.

ORIG.	DEST.	FREQ.	TRANSPORTANDO ...
17	43	2	Leva carreta cheia
28	17	1	Vai sem carreta
	43	20	Leva carreta cheia de cabinas
	43	3	Leva carreta cheia de longarinas
43	17	2	Leva carreta vazia que esperou descarregar
	28	20	Leva carreta vazia
52	28	4	Vai sem carreta

Tabela C.7 Fluxo de transporte realizado pelo transportador E.

ORIG.	DEST.	FREQ.	TRANSPORTANDO ...
17	18	5	Vai sem carreta
	43	2	Leva carreta cheia
18	17	2	Leva carreta cheia
	21	8	Leva carreta cheia de peças para pintar
	21	5	Vai sem carreta
	51	7	Vai sem carreta
	53	1	Leva carreta cheia de sucata
20	21	2	Leva carreta cheia
	27	2	Leva carreta cheia
	51	3	Leva carreta cheia
	51	6	Vai sem carreta procurar carreta para levar para 22
21	18	6	Leva carreta cheia de peças pintadas
	20	2	Leva carreta vazia
	22	2	Leva carreta vazia
	29	7	Leva carreta cheia
22	21	2	Leva carreta cheia
	21	7	Vai sem carreta
	23	2	Leva carreta cheia
	51	11	Leva carreta cheia
23	21	3	Vai sem carreta
	51	2	Leva carreta cheia
27	21	2	Leva carreta vazia que esperou descarregar
29	21	5	Leva carreta vazia
43	18	2	Leva carreta vazia
	21	2	Vai sem carreta
51	20	3	Leva carreta vazia
	22	11	Leva carreta vazia
	23	3	Leva carreta vazia
	29	7	Vai sem carreta
53	18	1	Leva carreta vazia que esperou descarregar

Tabela C.8 Fluxo de transporte realizado pelo transportador F.

ORIG.	DEST.	FREQ.	TRANSPORTANDO...
35	32	2	Vai sem carreta
	34	1	Vai sem carreta
	38	2	Vai sem carreta
	39	2	Leva carreta vazia
	43	2	Leva carreta cheia
	47	3	Vai sem carreta
38	32	2	Vai sem carreta
	34	2	Vai sem carreta
	43	2	Leva carreta cheia
	47	3	Vai sem carreta
39	32	2	Vai sem carreta
	35	2	Vai sem carreta
	35	2	Leva carreta cheia
	38	2	Vai sem carreta
	40	1	Vai sem carreta
	47	3	Vai sem carreta
	49	8	Vai sem carreta
	40	29	1
32		2	Vai sem carreta
35		2	Vai sem carreta
38		1	Vai sem carreta
47		1	Vai sem carreta
49		1	Vai sem carreta
41	39	2	Vai sem carreta
	43	2	Leva carreta vazia
	47	4	Vai sem carreta
	49	3	Vai sem carreta
	47	3	Leva carreta vazia
42	40	2	Vai sem carreta
	47	2	Vai sem carreta 30% das vezes
	47	3	Leve carreta cheia de embalagens 50% das vezes
	47	2	Leva carreta vazia 20% das vezes
43	26	2	Vai sem carreta
	29	1	Vai sem carreta
	32	2	Vai sem carreta
	38	2	Leva carreta vazia que esperou descarregar
	39	2	Vai sem carreta
	40	1	Vai sem carreta
	47	3	Vai sem carreta
	49	2	Vai sem carreta

Tabela C.9 Fluxo de transporte realizado pelo transportador F (continuação).

47	36	1	Leva carreta vazia e espera carregar
	39	2	Vai sem carreta
	41	1	Leva carreta cheia
	42	2	Leva carreta cheia
	43	3	Leva carreta cheia
	49	1	Leva carreta vazia
49	15	2	Leva carreta cheia e espera descarregar
	19	3	Leva carreta cheia
	20	1	Leva carreta cheia e espera descarregar
	22	1	Leva carreta cheia
	23	1	Leva carreta cheia e espera descarregar
	26	3	Leva carreta cheia e espera descarregar
	28	5	Leva carreta cheia e espera descarregar
	34	1	Leva carreta cheia
	34	1	Leva carreta cheia
	39	2	Vai sem carreta
	41	1	Vai sem carreta
	47	1	Vai sem carreta

## C.1 MODELAGEM DA DINÂMICA DOS TRANSPORTADORES

Para uma especificação da funcionalidade de cada transportador foram utilizadas redes PFS-R/E-MFG, adequadas para representarem o comportamento dinâmico destes elementos do sistema. A princípio, estes modelos não incorporam aspectos pertinentes a sua capacidade de trabalho, no que se refere a torque máximo e capacidade de subir rampas de uma determinada declividade.

A Tabela C.10 descreve os principais estados possíveis de um transportador operando no sistema.



Tabela C.10 Estados atingidos por um transportador em operação no sistema.

<b>Estado</b>	<b>Descrição do Estado</b>
<i>Repouso Ocioso</i>	Trator em repouso sem carreta
<i>Repouso Engate</i>	Trator em repouso para engate de carreta
<i>Repouso Desengate</i>	Trator em repouso para desengate de carreta
<i>Repouso Carga</i>	Trator em repouso aguardando carregamento da carreta
<i>Repouso Descarga</i>	Trator em repouso aguardando descarregamento da carreta
<i>Movimento Ocioso</i>	Trator em movimento sem carreta
<i>Movimento Carreta Vazia</i>	Trator em movimento com carreta vazia
<i>Movimento Carreta Com Carga</i>	Trator em movimento com carreta com carga

Considerando-se as informações da Tabela C.10, a Fig. C.1 apresenta a modelagem do comportamento dinâmico de cada transportador em PFS-R.

Por sua vez, detalhando-se o modelo da Fig. C.1 utilizando elementos E-MFG para representar o refinamento de cada uma das atividades, obtém-se o grafo apresentado na Fig. C.2.

Portanto, à medida em que um transportador chega em uma determinada estação de trabalho, se estiver rebocando uma carreta, poderá trazê-la carregada, ou não. Se estiver carregada, deve solicitar a descarga e, se estiver descarregada, poderá solicitar o seu carregamento. Este comportamento é descrito no modelo da Fig. C.3.



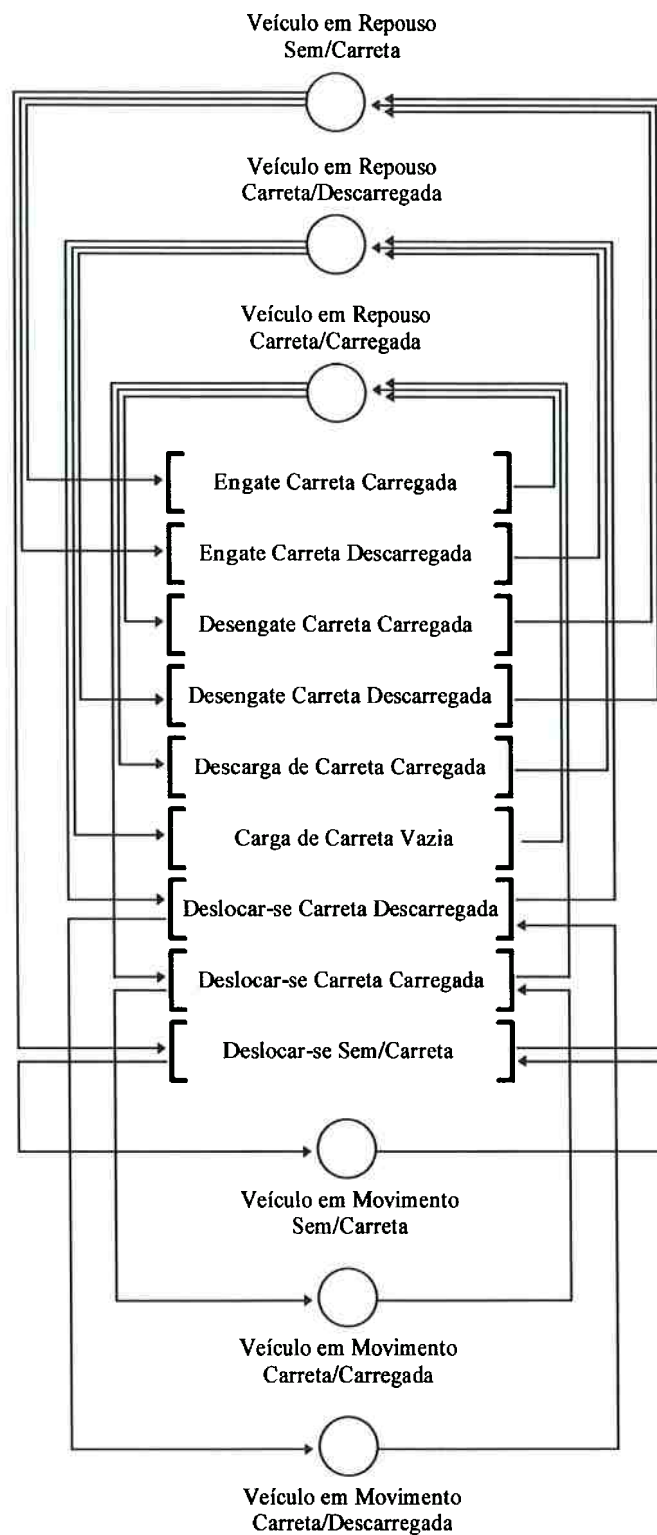


Fig. C.1 Modelo PFS-R genérico de cada um dos transportadores + Carreta adotado no estudo do sistema

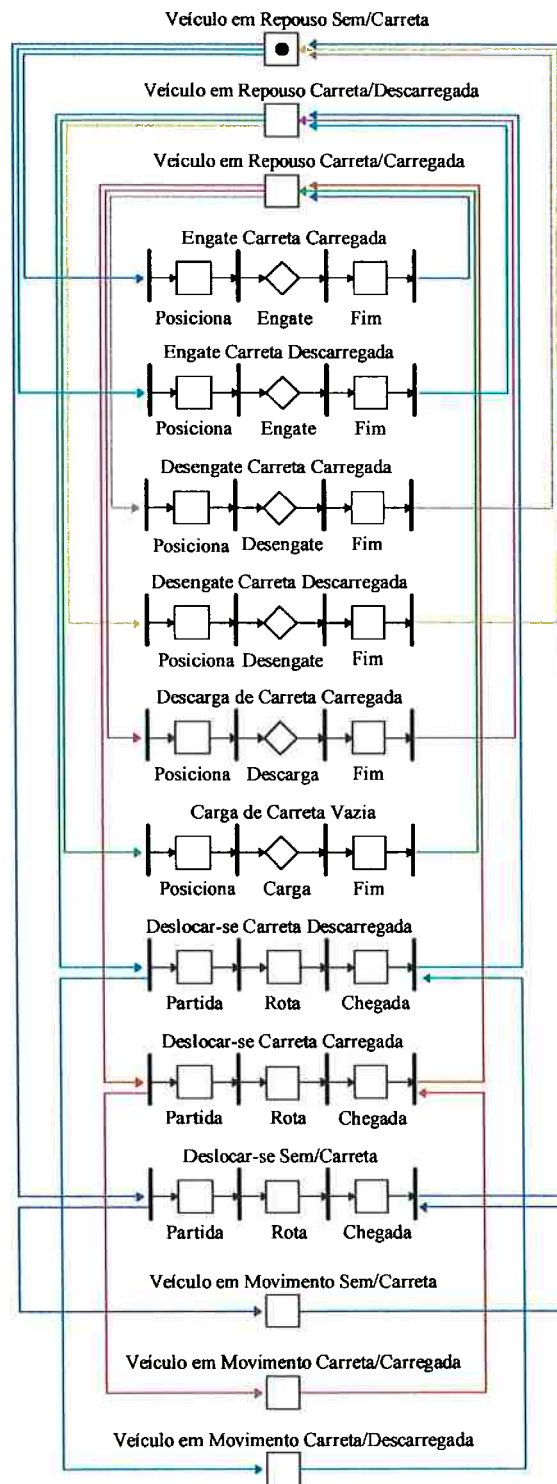


Fig. C.2 Modelo de um Transportador + Carreta em E-MFG

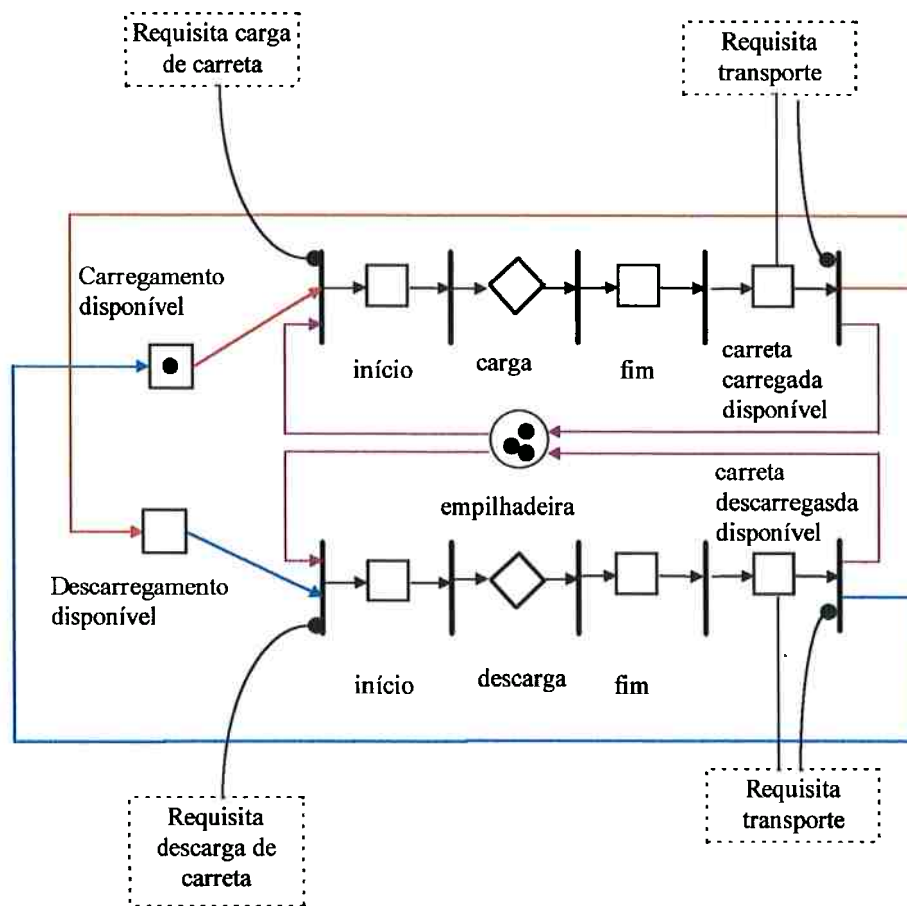


Fig. C.3 Modelo correspondente à operação de carga/descarga de carretas

A partir destes modelos fundamentais que representam a funcionalidade dos elementos que realizam o transporte no sistema, é possível realizar-se a modelagem de qualquer rota a ser percorrida por cada um dos transportadores, bastando representar cada trecho do percurso por um elemento do tipo *box capacidade* ou *simples* dependendo se o trecho da via permite o trânsito de mais de um transportador.

Durante a evolução dinâmica do sistema, conforme um transportador chega a uma determinada estação de trabalho, realiza as atividades propostas anteriormente, de acordo com o estado em que se encontra o sistema naquele instante.

Para exemplificar os modelos que podem ser construídos para representar as rotas a serem percorridas pelos VTs, apresenta-se a Fig. C.4 correspondente à rota do *transportador C* e a Fig. C.5 correspondente à rota do *transportador D*.

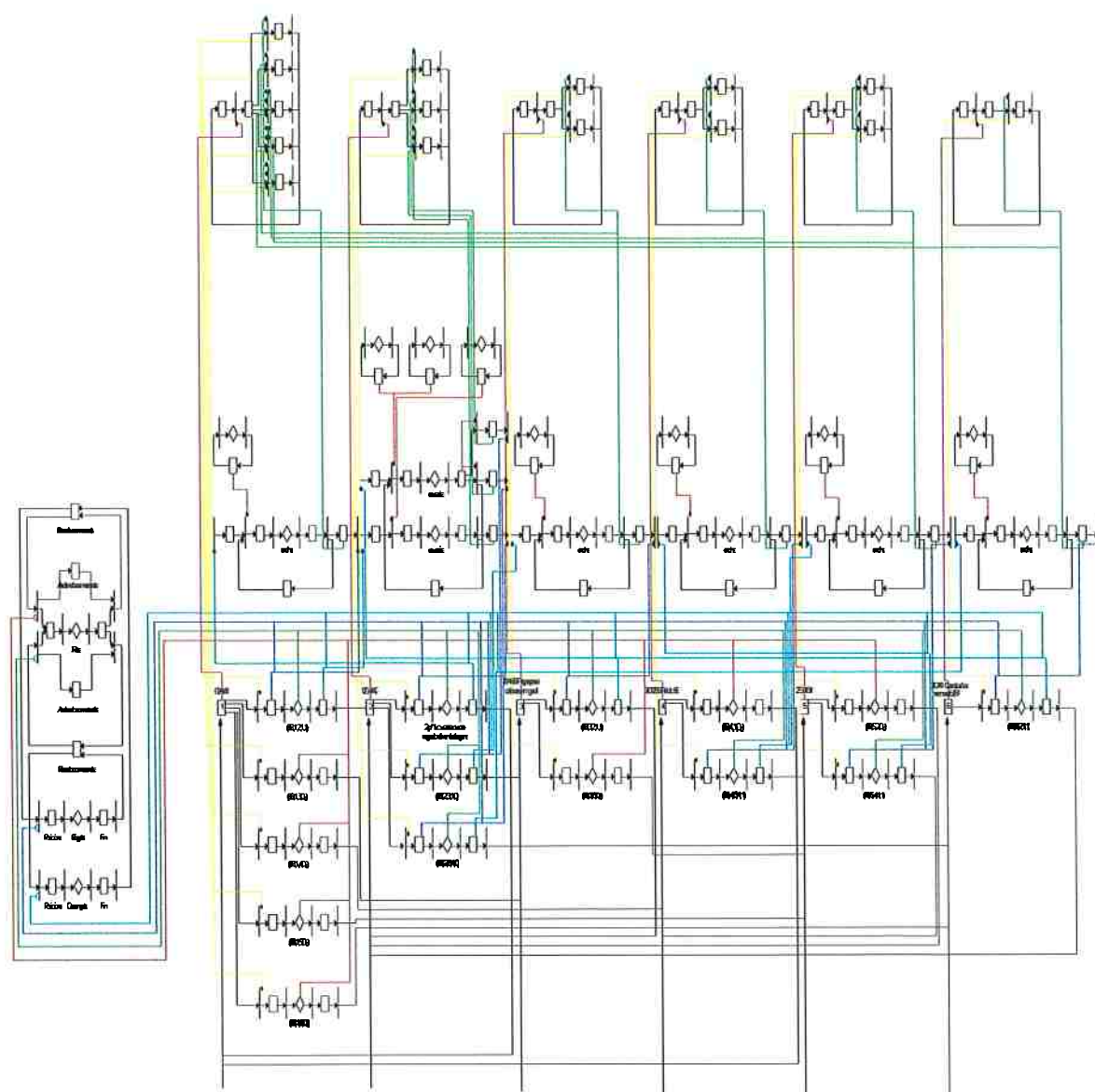


Fig. C.4 Modelo E-MFG da rota do transportador C.

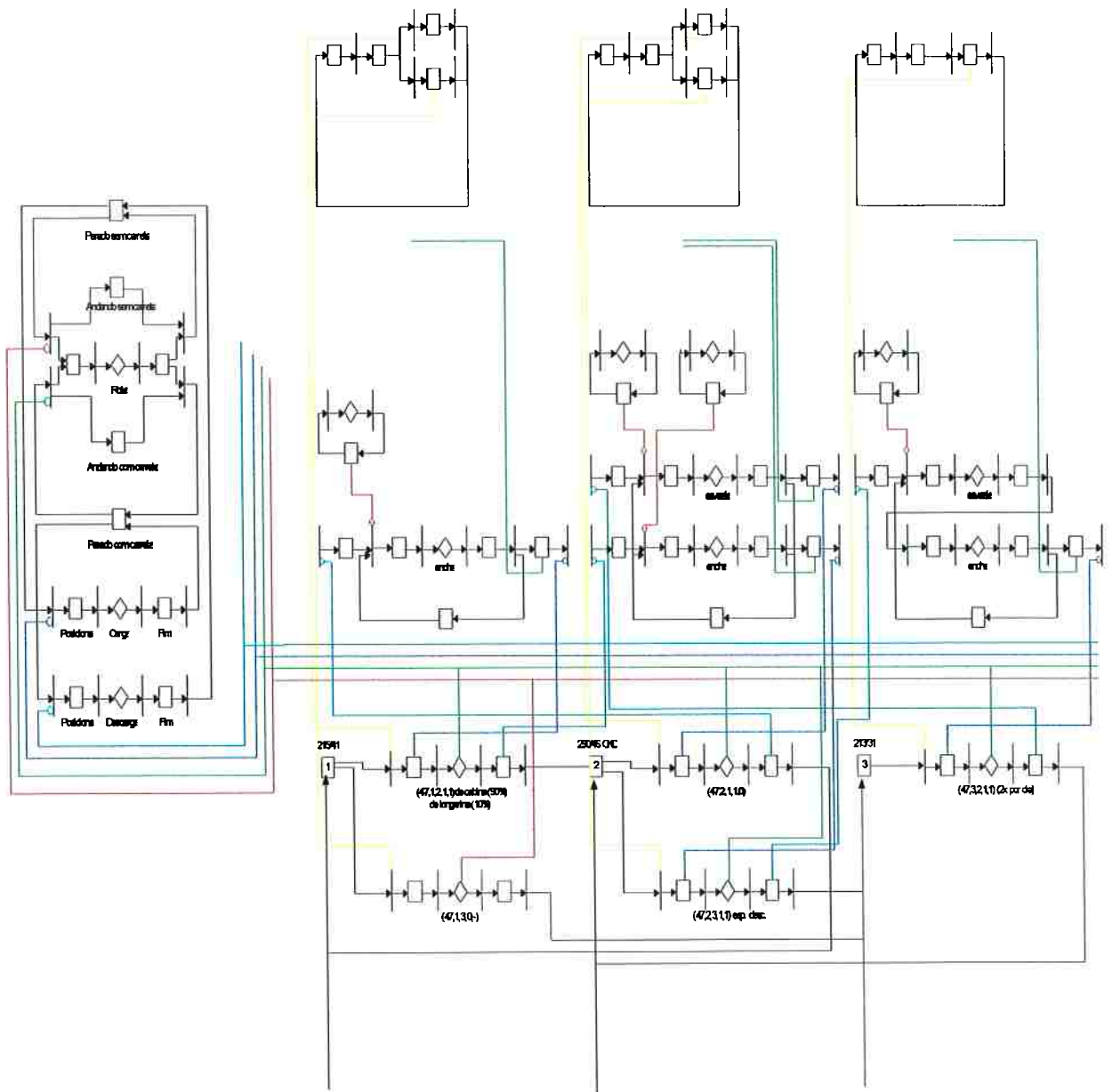


Fig. C.5 Modelo E-MFG da rota do transportador C.

## **ANEXO D**

### **EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE DE SAPS**

Como exemplo de aplicação do procedimento de projeto introduzido no Capítulo 6, apresenta-se aqui o resultado obtido na especificação do controle de sistemas integrados de centrifugação, tendo como objetivo final do sistema a centrifugação do melaço de cana de açúcar.

Este exemplo é parte do projeto de modernização do sistema de fabricação de açúcar, de uma usina instalada no estado de São Paulo.

De acordo com a etapa de análise das necessidades, realizou-se o estudo do comportamento dinâmico do objeto de controle que resultou em uma proposta inicial de decomposição do sistema de controle em três modos fundamentais:

- O modo de controle local em que é permitida a operação manual de cada máquina de centrifugação, havendo uma intervenção direta do operador no processo.
- O modo de controle automático de cada máquina de centrifugação em que todo o processo evolui de forma autônoma, a partir de uma série de comandos

e intertravamentos previamente especificados de forma adequada à dinâmica que se deseja para o sistema.

- O modo de controle supervísório que realiza a coordenação (supervisão) de diversas centrífugas operando conjuntamente, de acordo com a demanda presente.

Após uma análise estruturada das necessidades em que se avaliou as diversas possibilidades para a implantação do controle de sistemas integrados de máquinas de centrifugação, tanto a nível lógico quanto a nível físico, a próxima fase consistiu em definir-se as necessidades de fato, realizando-se uma descrição das funções de controle de forma estruturada, de acordo com a metodologia de projeto descrita na seção 6.2.

Assim, apresenta-se a seguir uma descrição sistemática das funções de controle de uma máquina de centrifugação a ser operada em modo manual ou automático e o fluxo destas funções de controle, em que se modela efetivamente a dinâmica de informações de controle realizada entre o sistema de controle e o objeto de controle, representando-se inclusive modelos dos dispositivos de comando e monitoração, bem como os modelos dos diversos atuadores e detetores.

## **D.1 MODELO DA CENTRÍFUGA**

A Fig. D.1 apresenta um modelo estrutural da centrífuga que se constitui no objeto de estudo deste Anexo. Sendo assim, são descritos os vários dispositivos de atuação e detecção presentes nesta estrutura, que devem ser adequadamente acionados e

monitorados, para que a centrífuga apresente um comportamento dinâmico compatível com a tarefa de processar o melaço para a fabricação de açúcar.

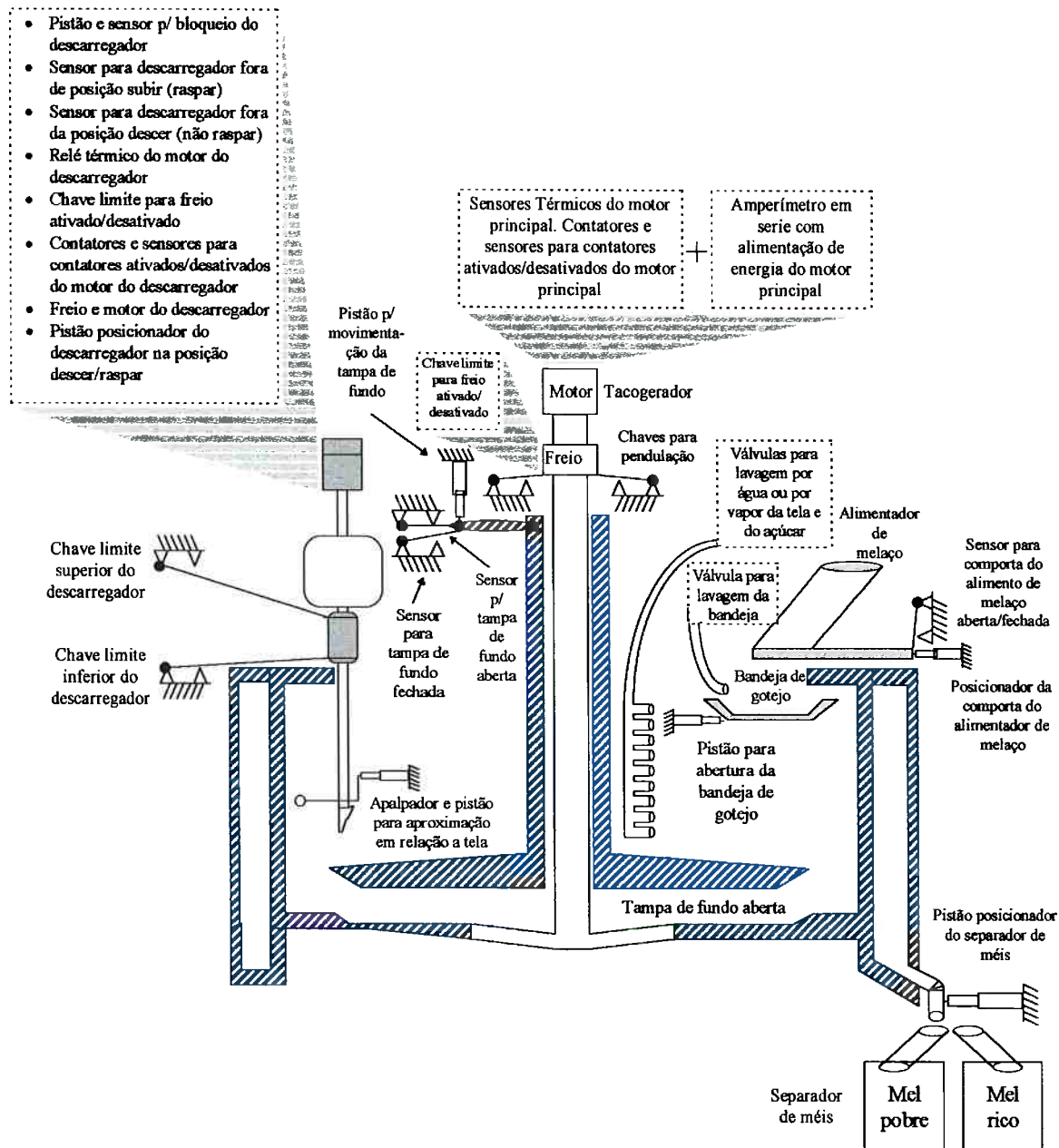


Fig. D.1 Modelo estrutural da centrífuga



Durante a evolução do processo, a velocidade de centrifugação varia de acordo com o esboço ilustrado no gráfico da Fig. D.2.

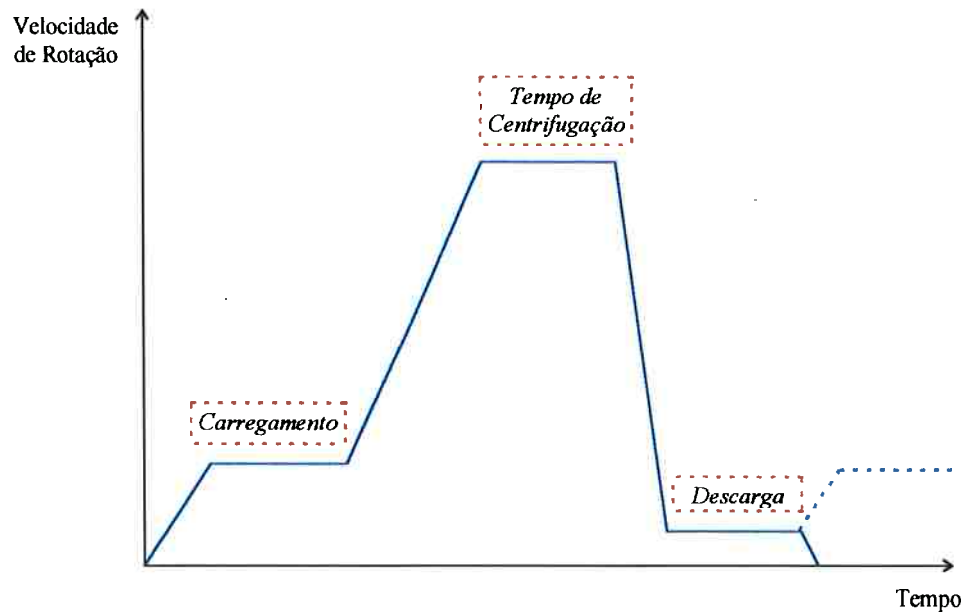


Fig. D.2 Esboço da curva de variação de velocidade de rotação da centrífuga em função do tempo

## D.2 DIAGRAMA DE SISTEMATIZAÇÃO DAS FUNÇÕES

Para a estruturação das funções de controle são propostos cinco níveis hierárquicos condizentes com o nível de complexidade do comportamento dinâmico do processo. Inicialmente, define-se o modo de operação da centrífuga e as funções de controle pertinentes a esta funcionalidade. A interpretação deste diagrama é simples e é realizada aplicando-se a técnica apresentada em 6.2. Sendo assim têm-se:

- A correlação entre um determinado nível e seu nível imediatamente inferior à direita deve ser interpretada como uma resposta a “*como realizar uma determinada função*”.
- Por sua vez, a correlação entre um determinado nível e seu nível imediatamente superior deve ser interpretada como uma resposta a “*porque realizar uma determinada função*”.

Neste contexto, define-se os três primeiros níveis descritos pelo diagrama ilustrado na Fig. D.3.

A seguir, apresenta-se uma sucessão de diagramas a partir da Fig. D.4 até a Fig. D.14 correspondentes aos níveis inferiores de detalhamento das funções definidas no *Nível-3* da Fig. D.3.

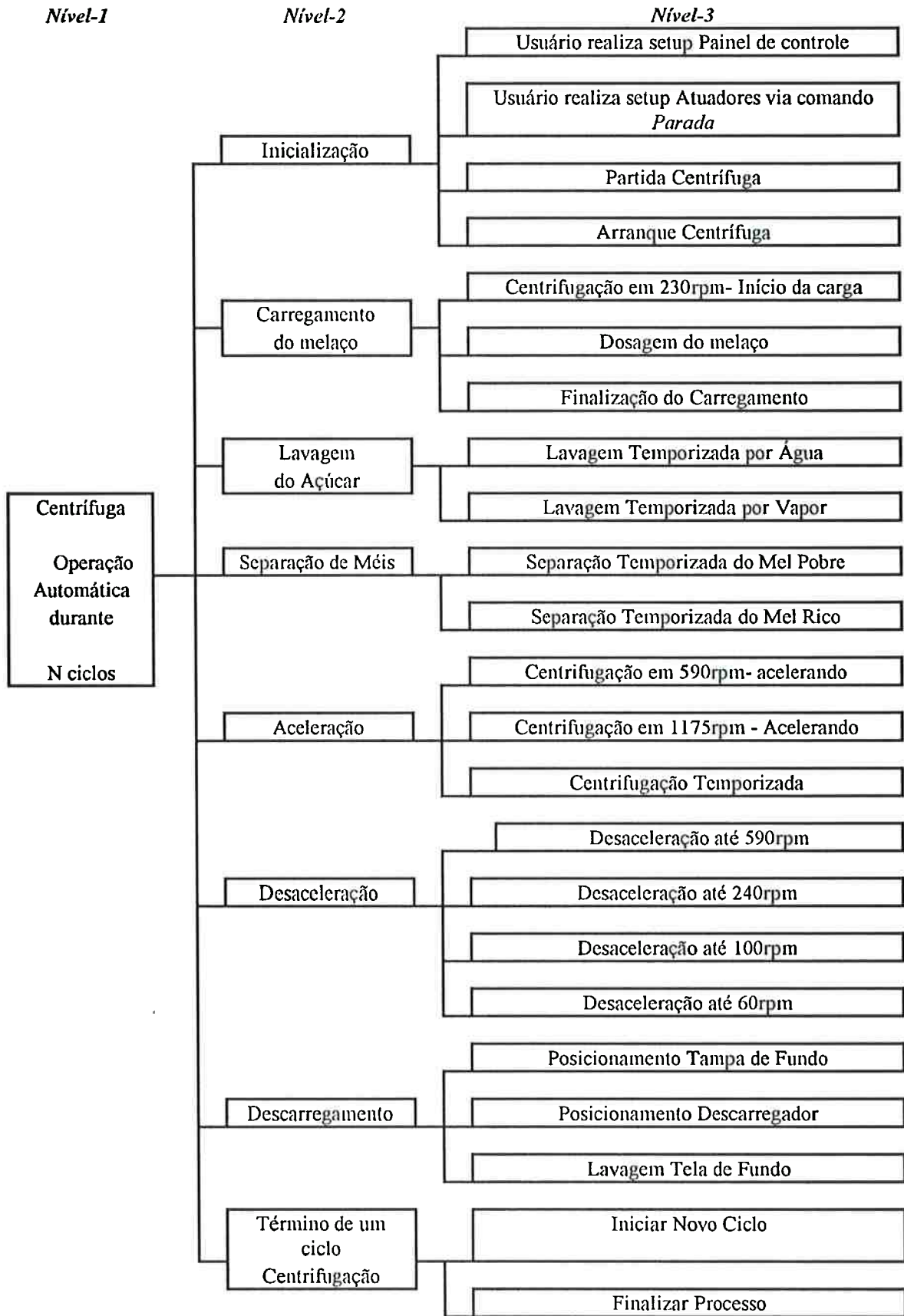


Fig. D.3 Diagrama correspondente aos três primeiros níveis das funções de controle.

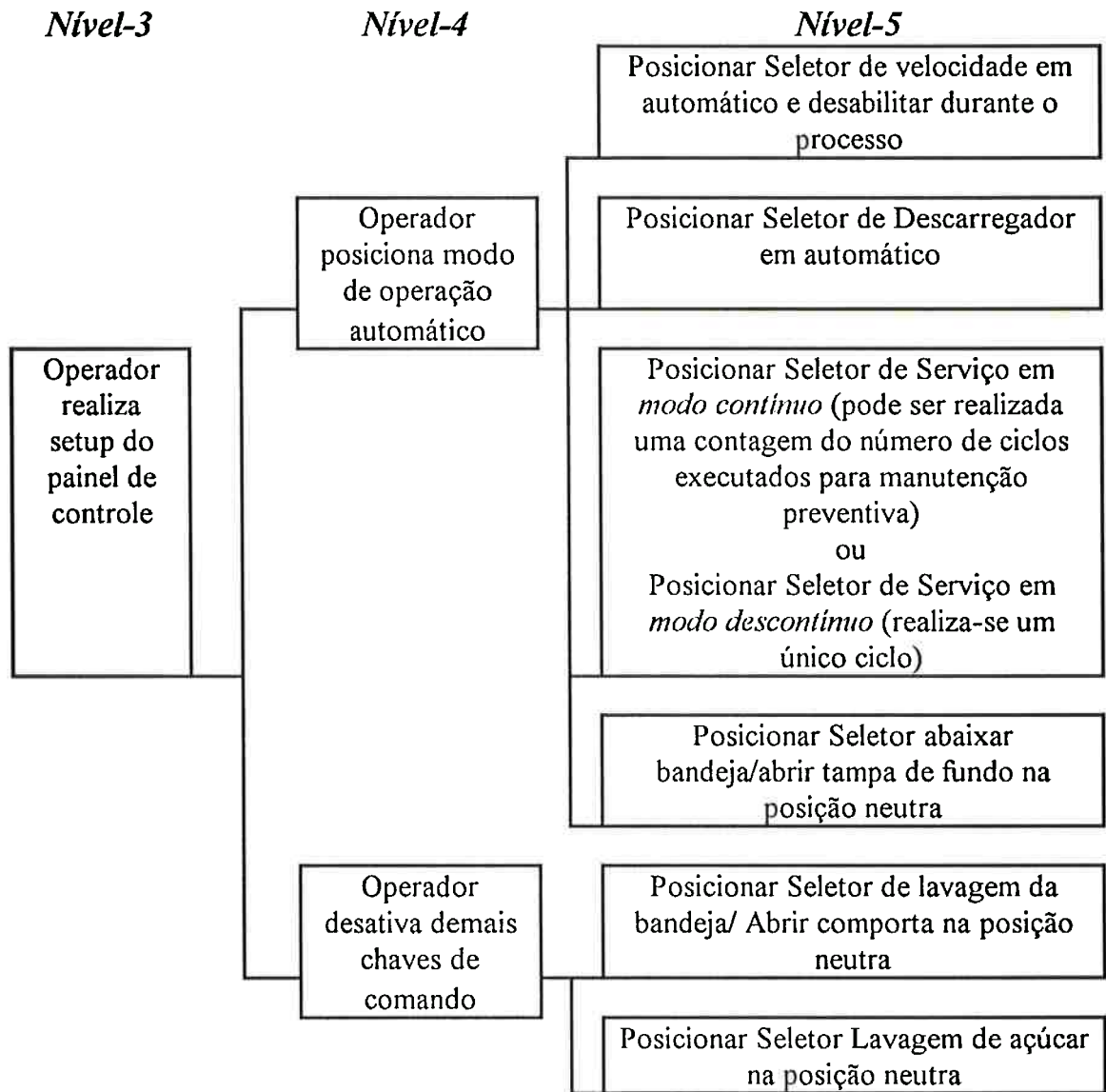


Fig.D.4 Diagrama da função de controle *Operator realiza setup do painel de controle*

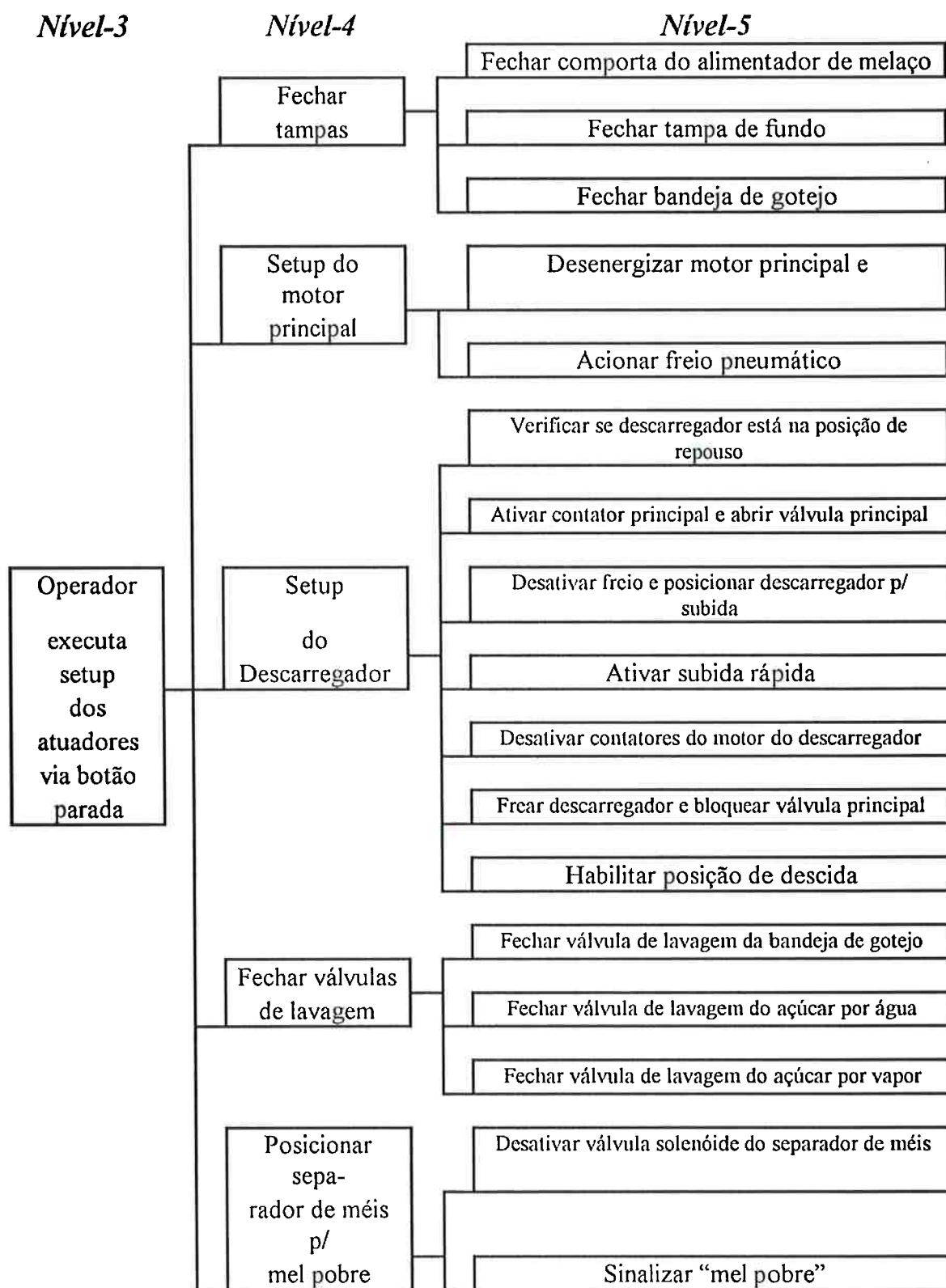


Fig. D.5 Diagrama da função de controle *Operador executa setup dos atuadores via botão de parada*

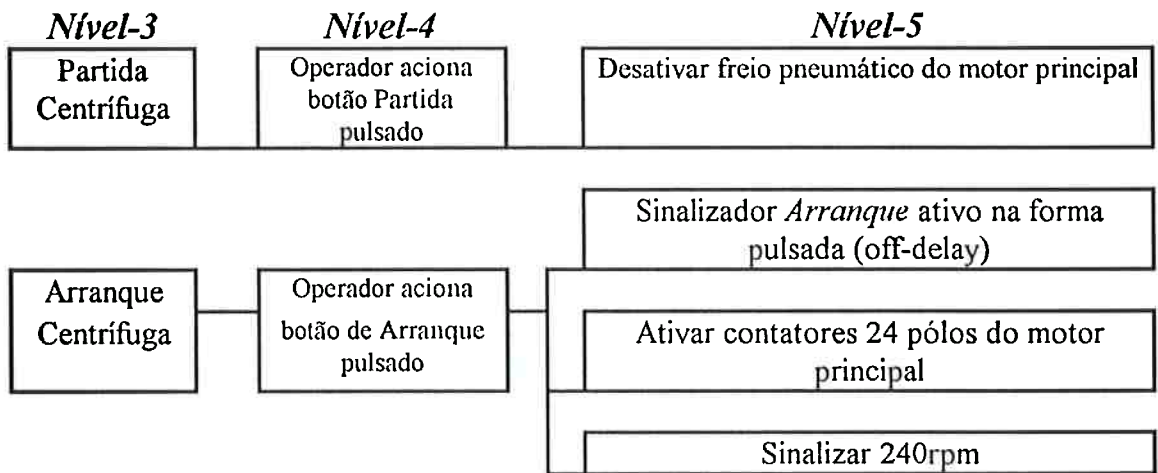


Fig. D.6 Diagrama das funções de controle *Partida da Centrifuga e Arranque da Centrifuga*

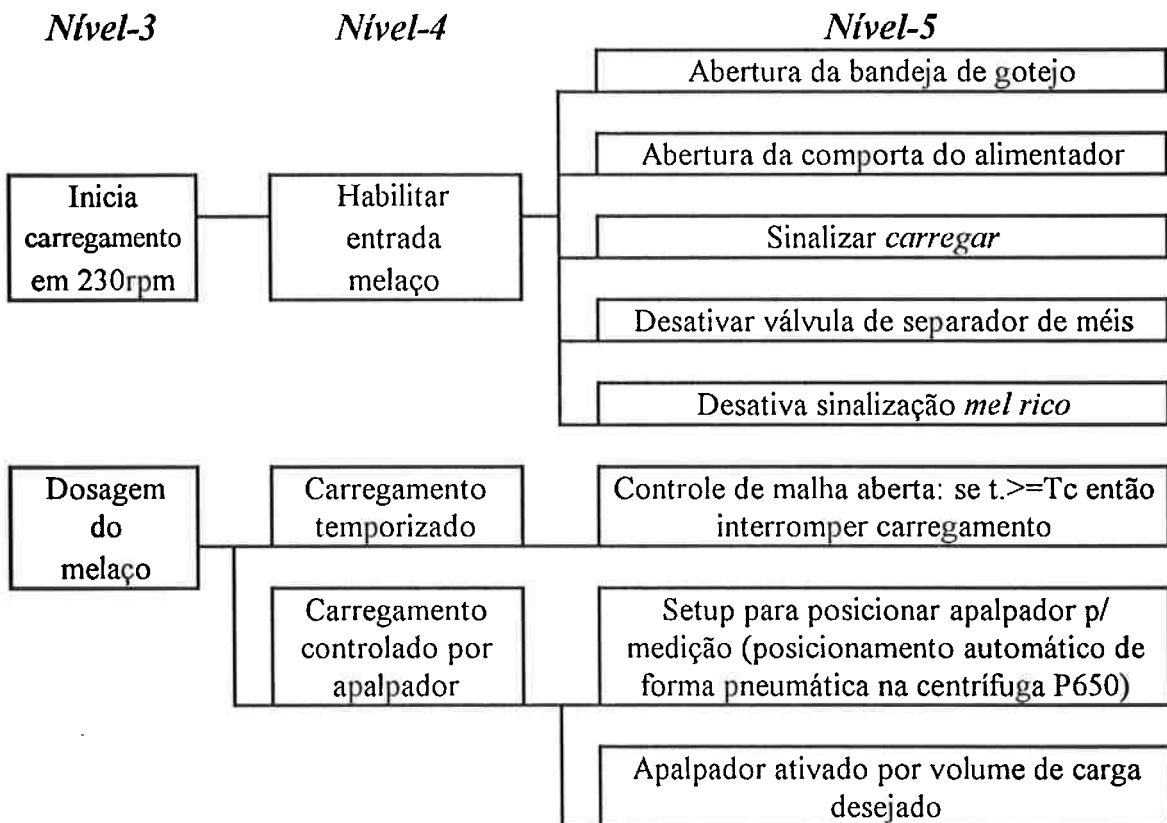


Fig. D.7 Diagrama das funções de controle *Inicia carregamento em 230rpm e Dosagem do melaço*

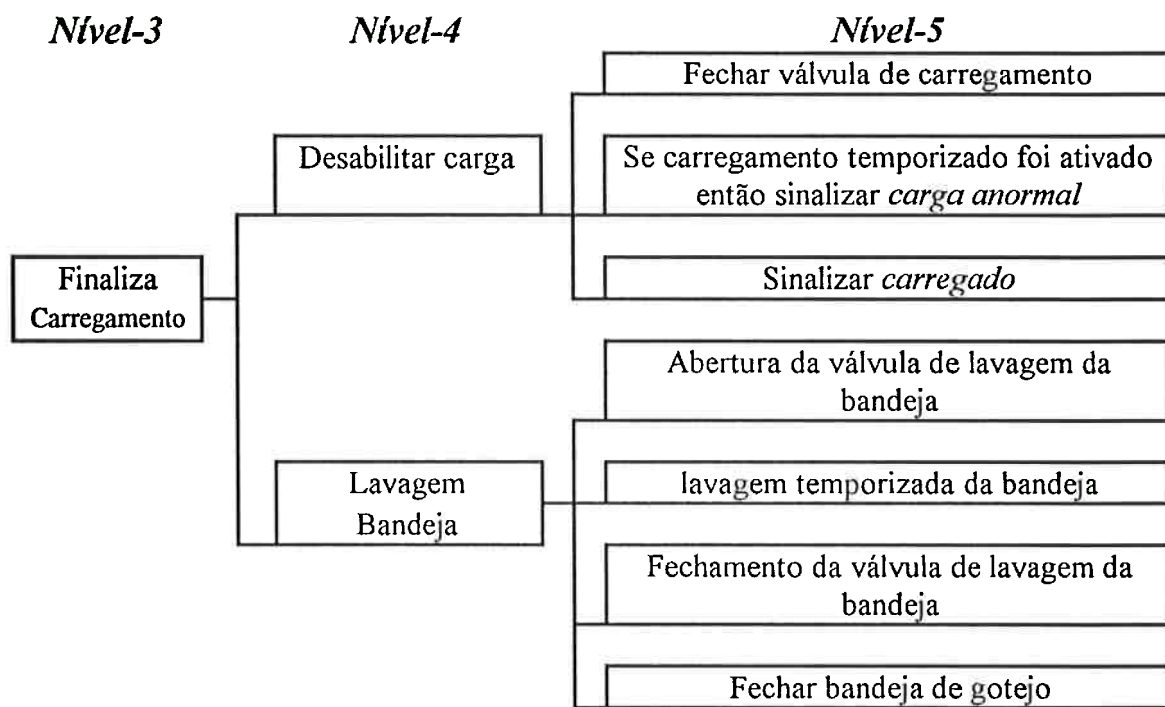


Fig. D.8 Diagrama da função de controle *Finaliza carregamento*

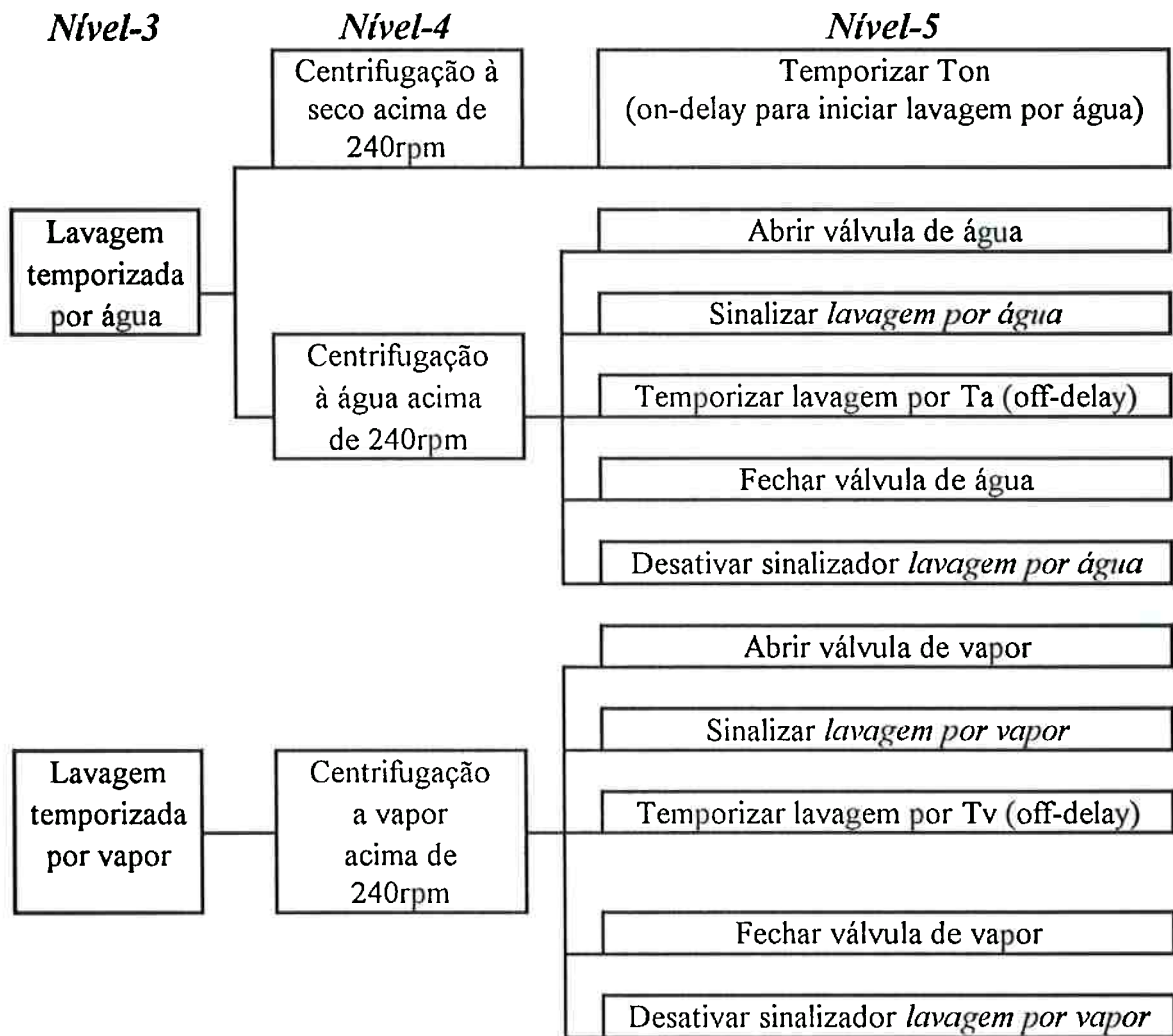


Fig. D.9 Diagrama das funções de controle *Lavagem temporizada por água* e *Lavagem temporizada por vapor*



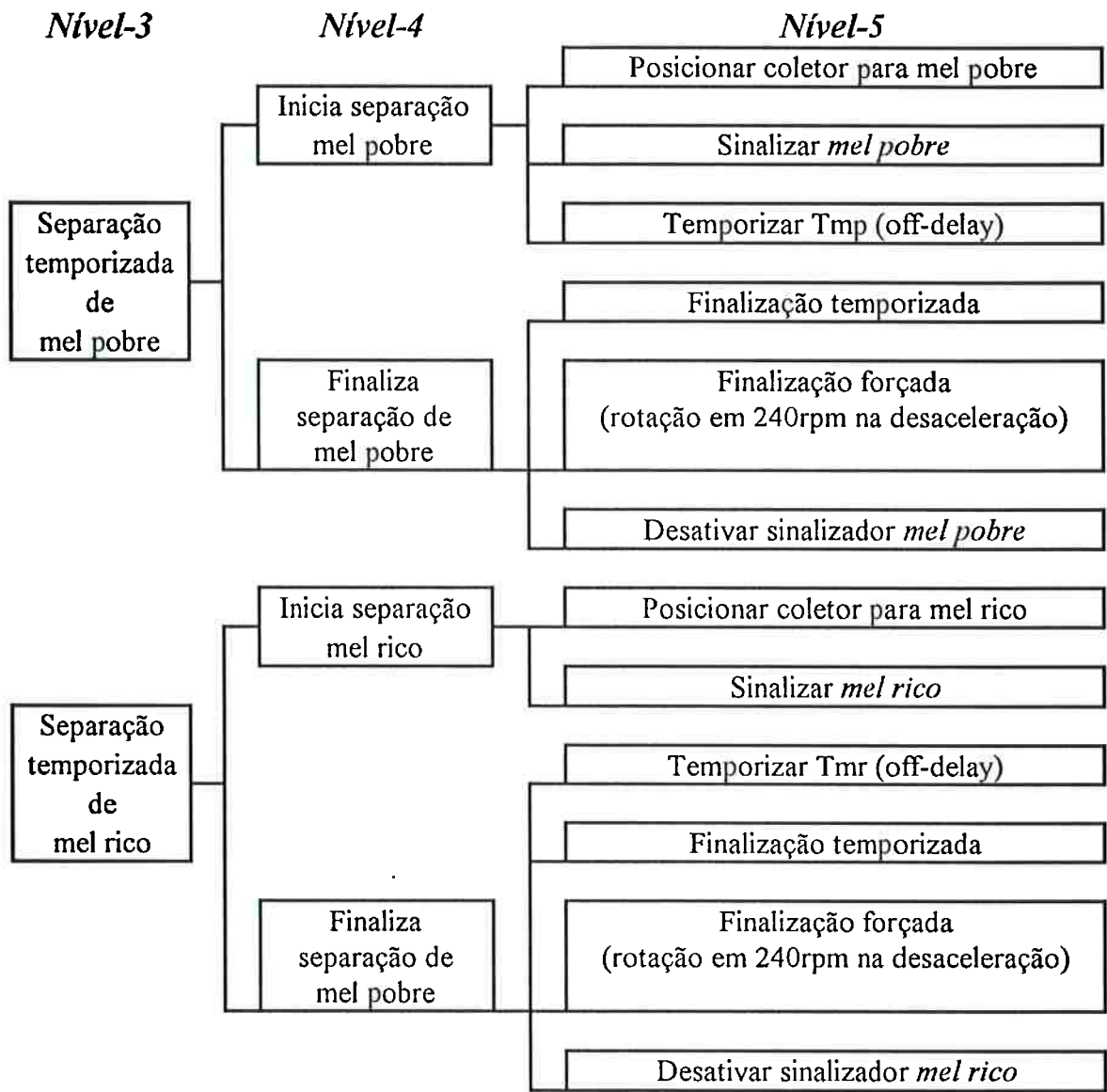


Fig. D.10 Diagrama das funções de controle *Separação temporizada de mel pobre* e *Separação temporizada de mel rico*

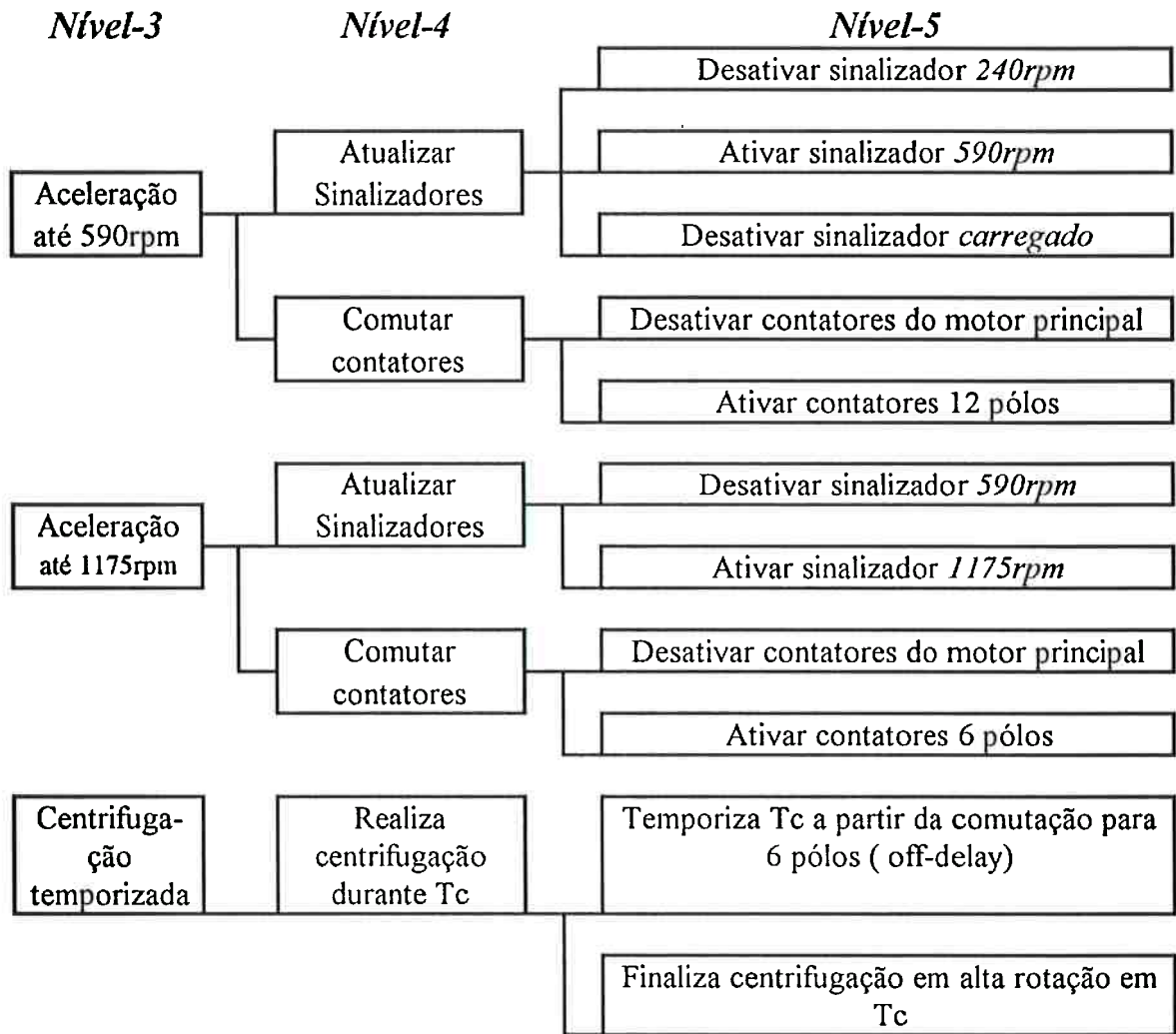


Fig. D.11 Diagrama das funções de controle *Aceleração até 590rpm*, *Aceleração até 1175rpm* e *Centrifugação temporizada*

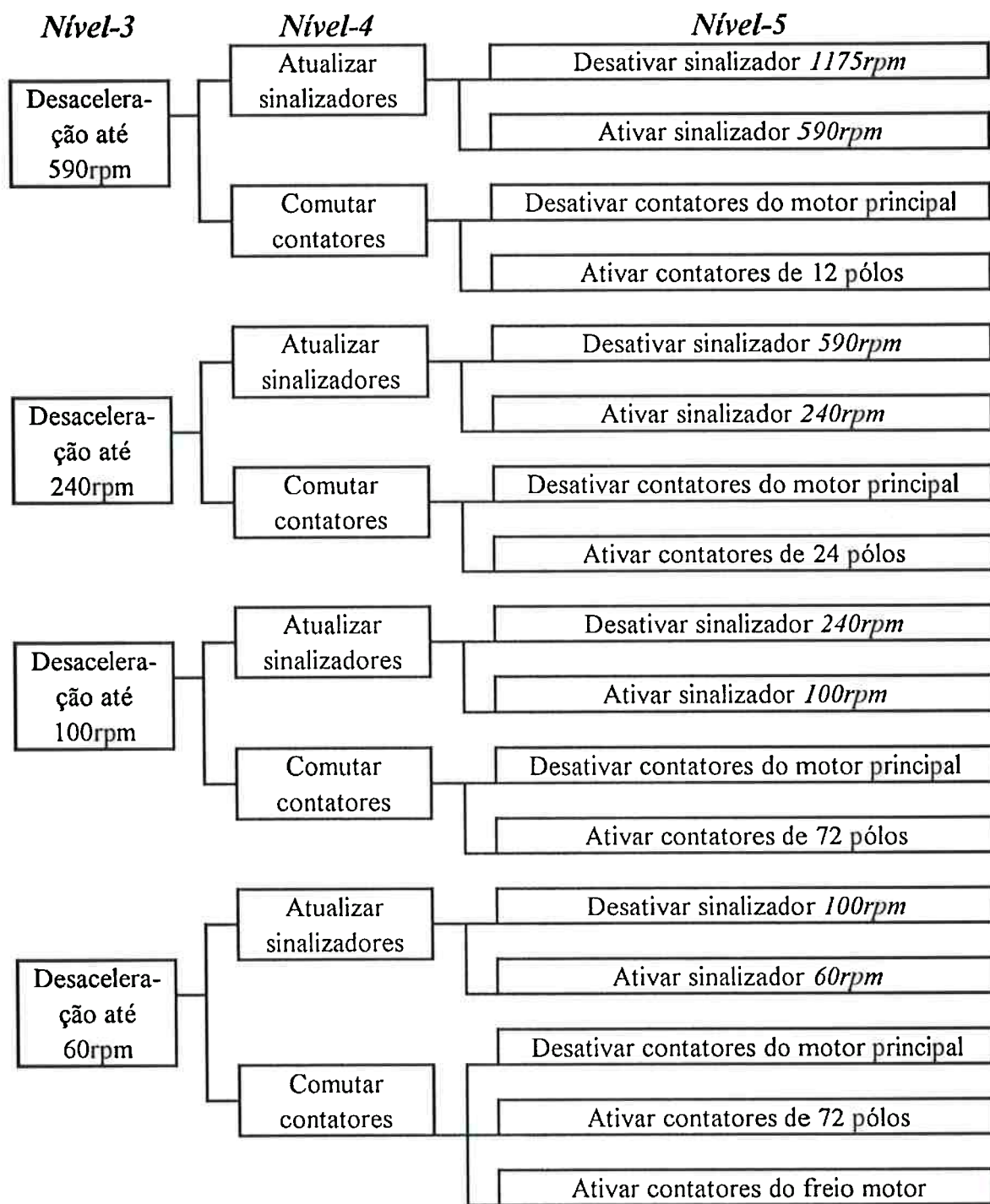


Fig. D.12 Diagrama das funções de controle *Desaceleração até 590rpm*, *Desaceleração até 240rpm*, *Desaceleração até 100rpm* e *Desaceleração até 60rpm*.

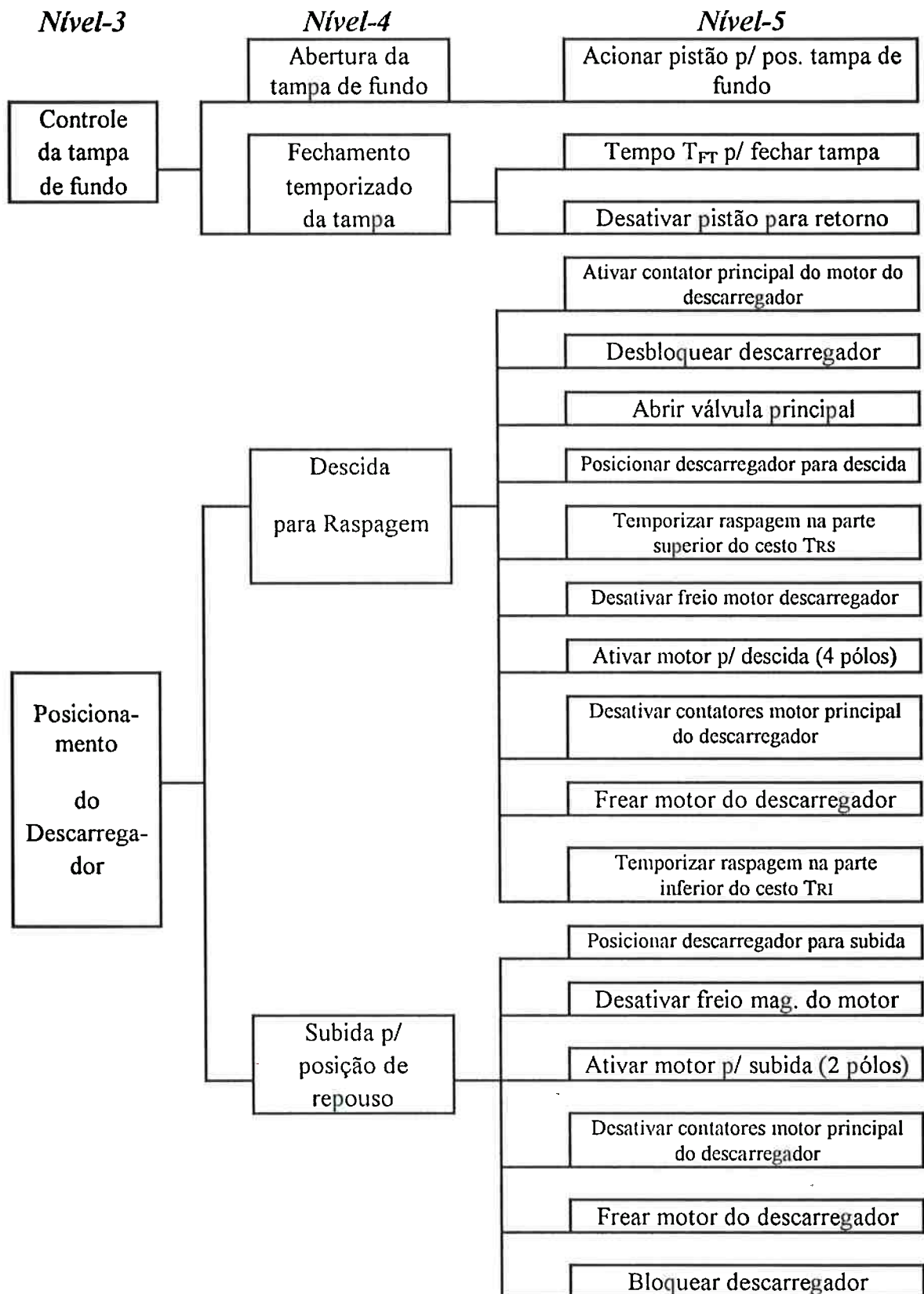
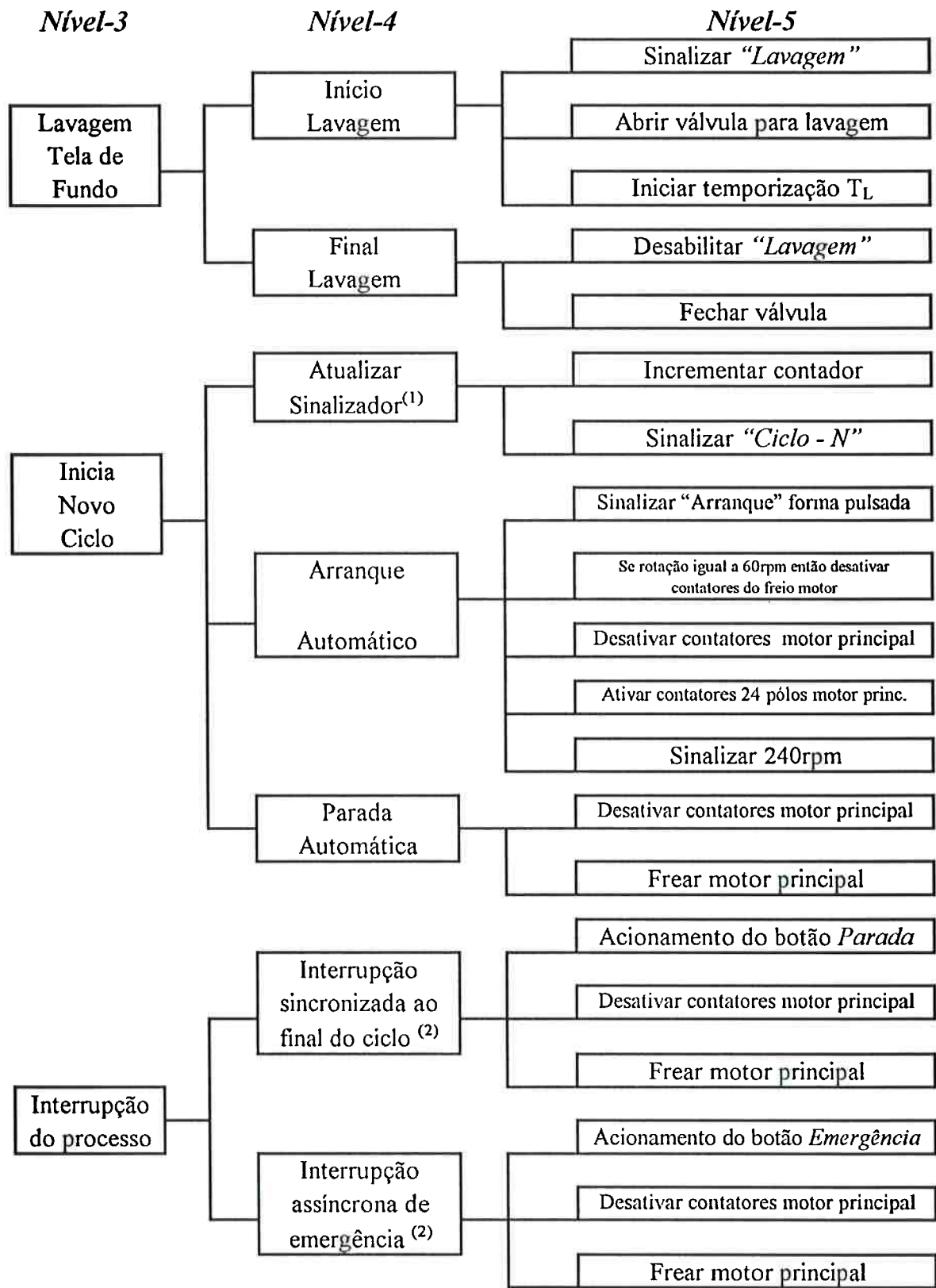


Fig. D.13 Diagrama das funções de controle *Controle da tampa de fundo e Posicionamento do descarregador*



Obs<sup>(1)</sup>. Este sinalizador fornece um parâmetro importante para a manutenção preventiva do equipamento e dimensionamento da produtividade de cada unidade.

Obs<sup>(2)</sup>. Atualmente, há os dois botões que ativam a interrupção do processo. Segundo a Projeletra, são redundantes. Está sendo proposto uma distinção destes dois atuadores a nível de realização do controle.

Fig. D.14 Diagrama das funções de controle *Lavagem da tela de fundo, Inicia novo ciclo e Interrupção do processo*

Definidas as funções de controle, na próxima seção é descrito o fluxo destas funções.

### D.3 MODELAGEM DO FLUXO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE

O fluxo é representado em PFS-R/E-MFG para o desenvolvimento do modelo do sistema tanto de sua parte operativa quanto de sua parte de controle, permitindo uma descrição do sistema a partir de modelos realistas em que a evolução do comportamento dinâmico do mesmo será governada a partir da ocorrência de eventos pertinentes ao processo, de acordo com a natureza do sistema físico em sí.

A Fig. D.15 ilustra o modelo conceitual PFS do sistema, de acordo com o procedimento apresentado na seções 6.3 e 6.4.

Este modelo concilia as vantagens de facilidade de interpretação (representação de alto nível em linguagem natural) e de seu formalismo intrínseco que exige por parte do projetista uma reflexão objetiva sobre *o que* e *como* deseja representar a funcionalidade de cada parte do sistema e as implicações de cada decisão tomada em relação ao comportamento do sistema global. Este modelo permite uma primeira visualização da forma como as diversas atividades relativas ao processo de centrifugação estão sincronizadas.

Por exemplo, a partir do momento em que a atividade *Carregamento do Melaço* encerra-se, inicia-se a atividade *Centrifugação* que corresponde à aceleração da centrífuga a partir dos 240rpm conforme poderá ser observado nos modelos subsequentes.

Atingido este estado, é possível iniciar-se as atividades de *Separação de Méis e Lavagem do Açúcar* paralelamente e de forma independente.

Por outro lado, para iniciar-se a atividade de *Descarregamento* é necessário que todo o processo de desaceleração até 100rpm já tenha sido realizado e as atividades de *Separação de Méis e Lavagem do Açúcar* também já devem ter sido concluídas.

A partir do modelo conceitual da Fig. D.15, desenvolve-se, a partir de refinamentos sucessivos, um processo de detalhamento da funcionalidade de cada uma das atividades do modelo representado nesta figura, conforme sugere a metodologia PFS-R/E-MFG.

Os principais resultados do procedimento de refinamento são apresentados através de modelos PFS-R/E-MFG desenvolvidos para representarem o comportamento dinâmico do sistema em estudo. Estes grafos são ilustrados a partir da Fig. D.16 até a Fig. D.36.

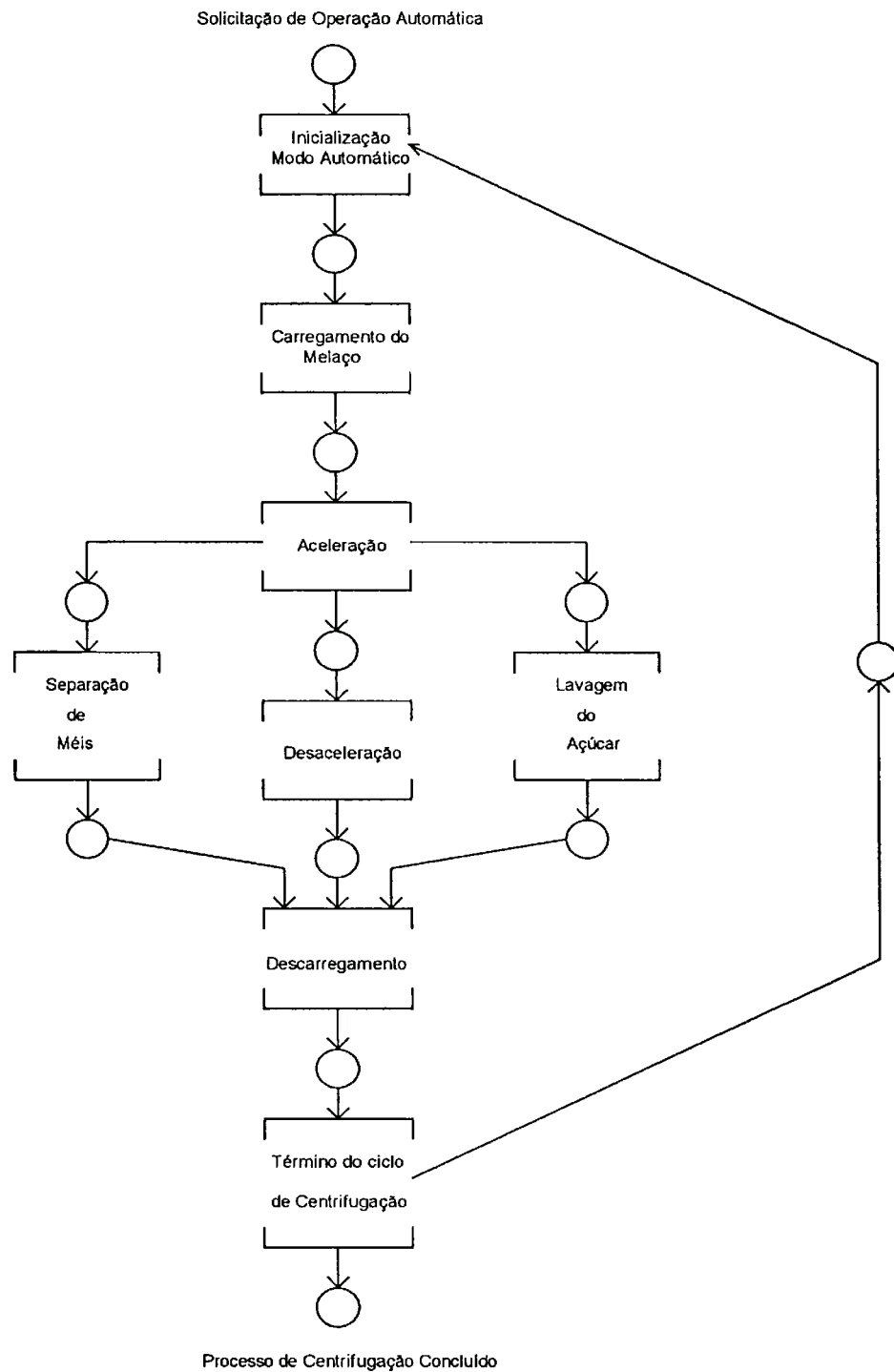


Fig. D.15 Modelo PFS do sistema



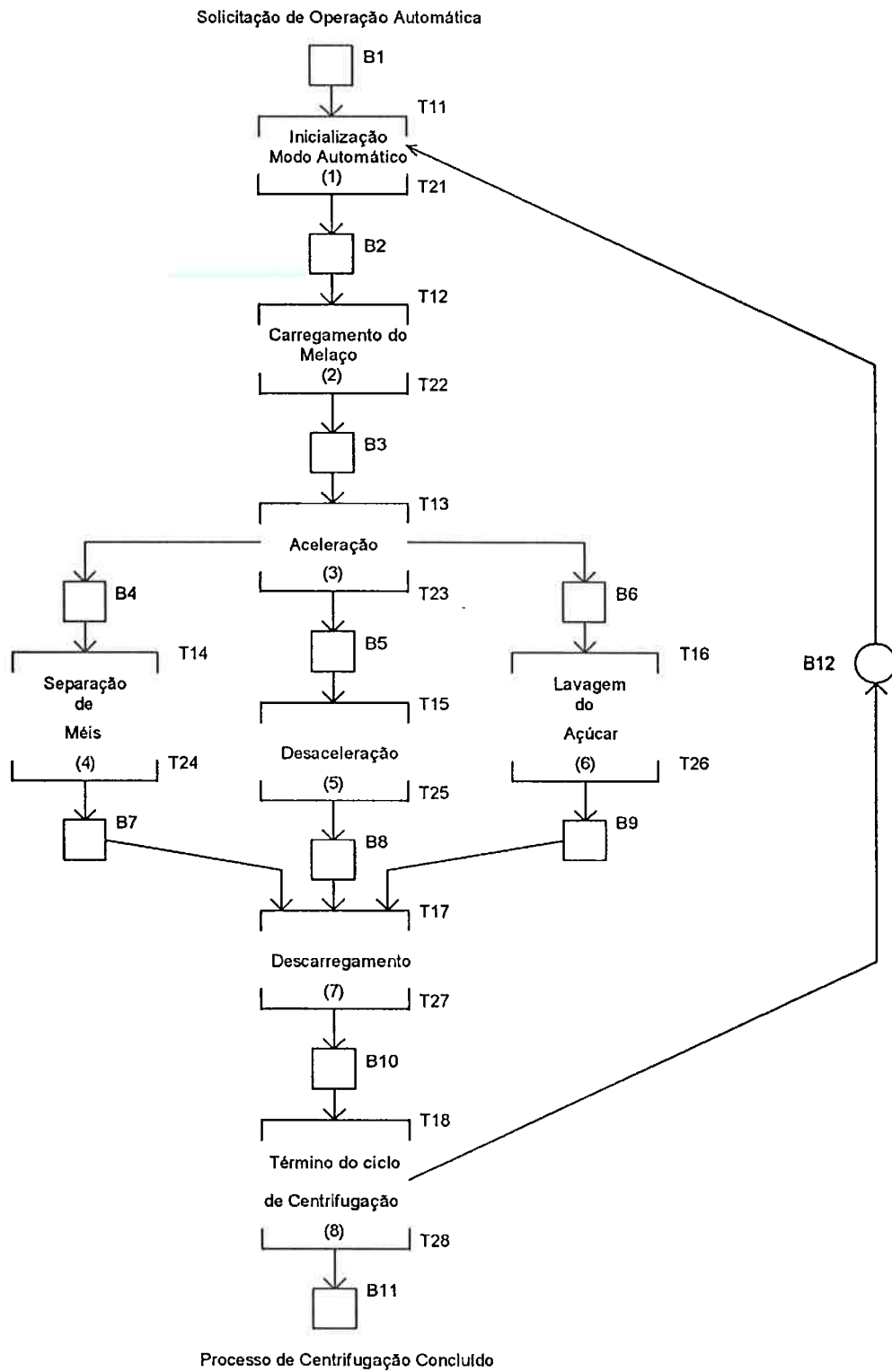


Fig. D.16 Modelo MFG/PFS do sistema

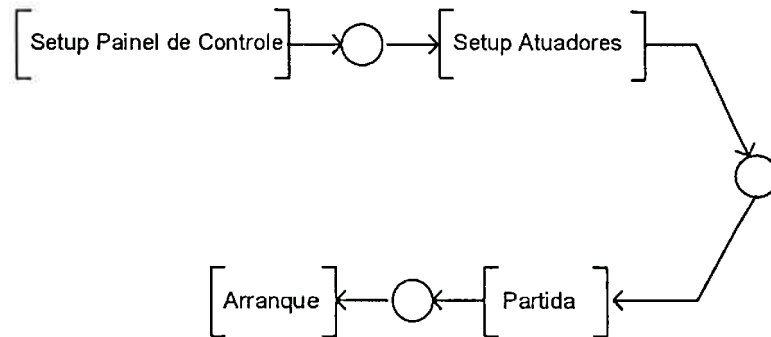


Fig. D.17 Modelo PFS da atividade /Inicialização Modo Automático.

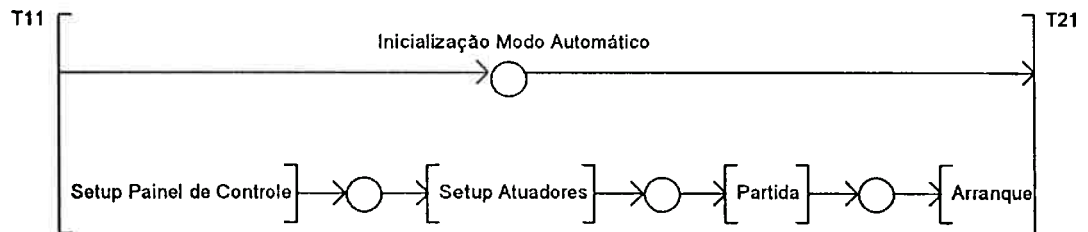


Fig. D.18 Modelo MFG/PFS da atividade /Inicialização Modo Automático.

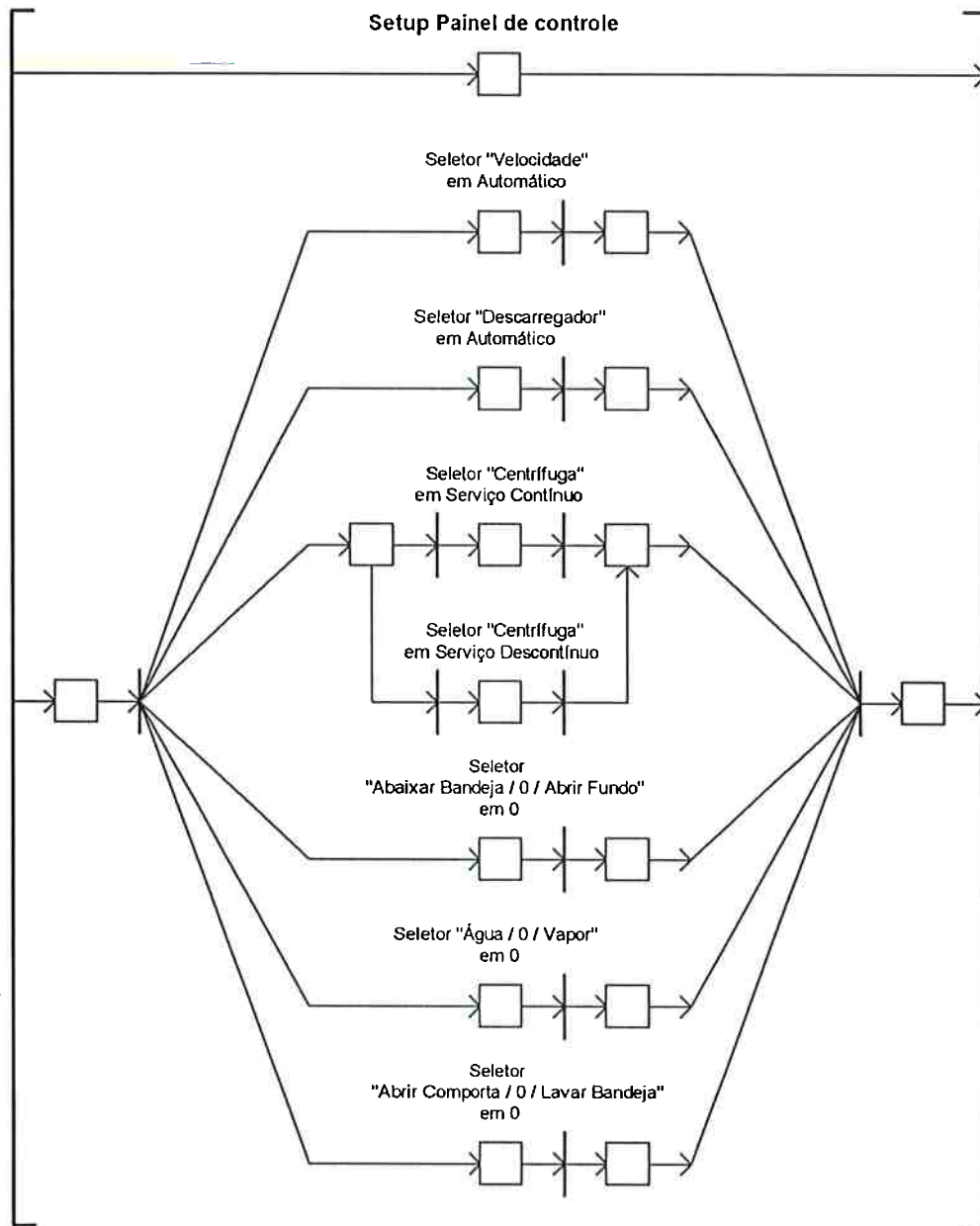


Fig. D.19 Modelo MFG da atividade /Setup Painel de Controle.

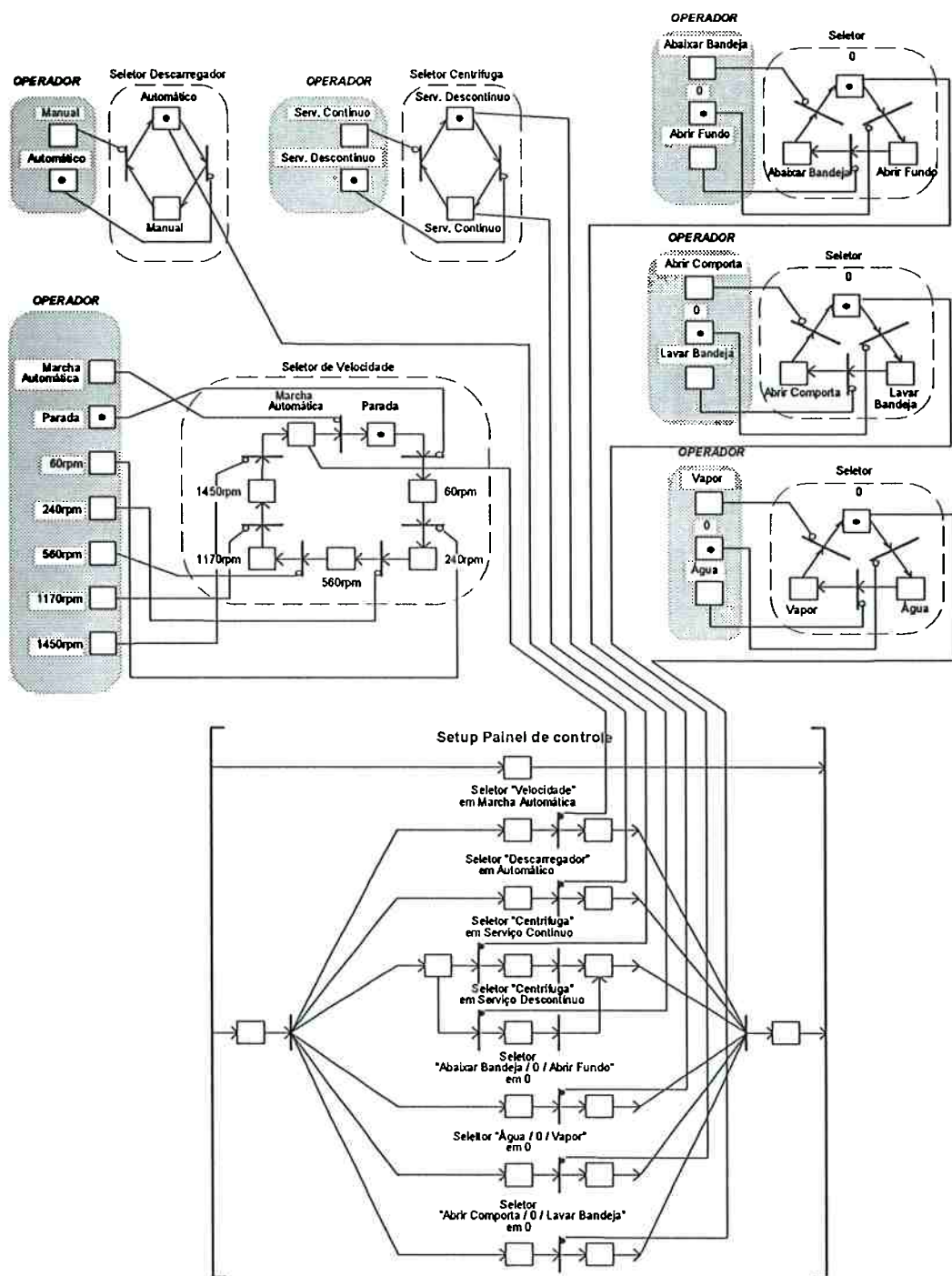


Fig. D.20 Modelo MFG da atividade /*Setup Painel de Controle* e sua conexão com o dispositivo de comando.

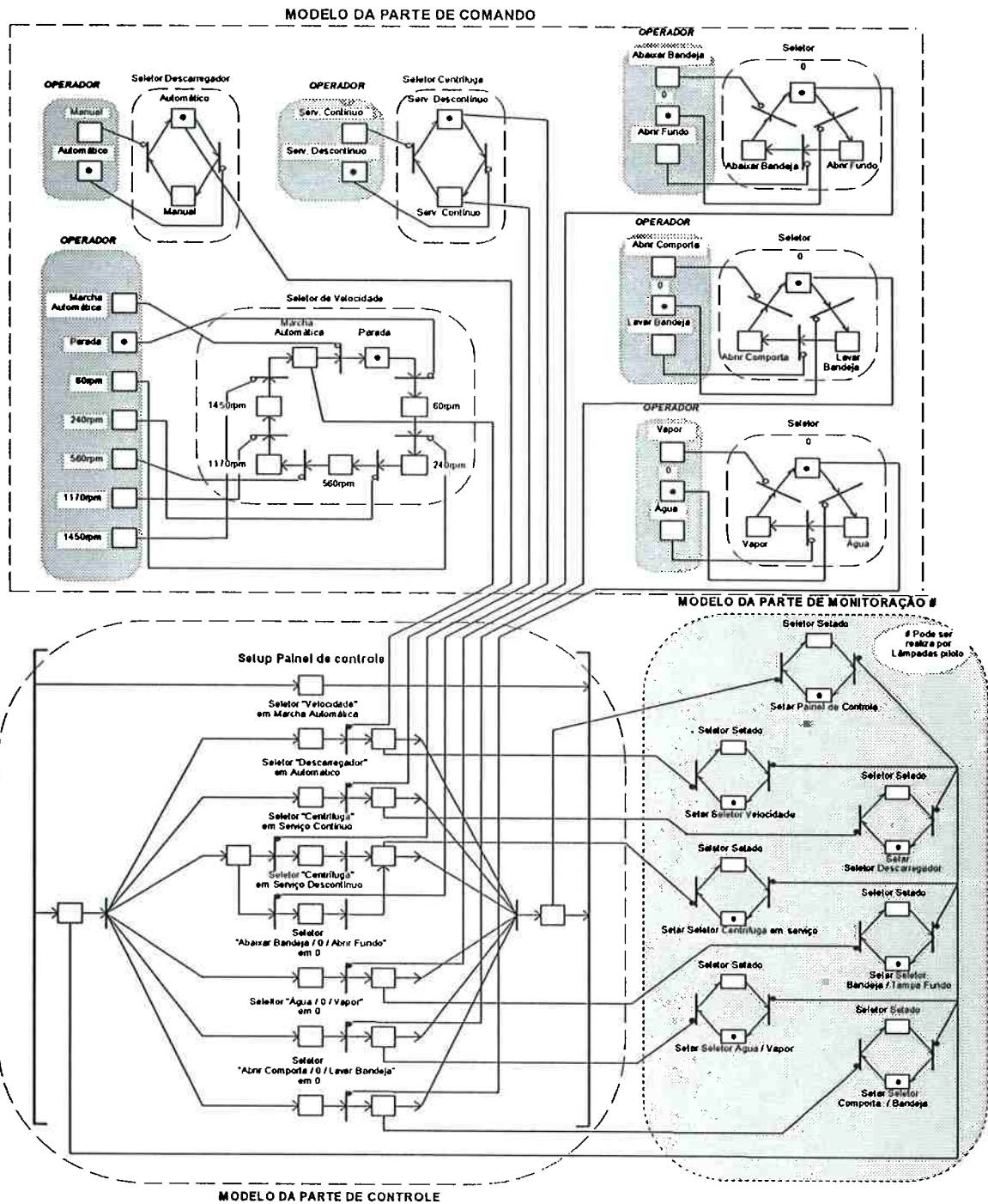


Fig. D.21 Modelo da atividade /*Setup Atuadores* e sua conexão com o modelo da parte de controle, da parte de comando e da parte de monitoração.

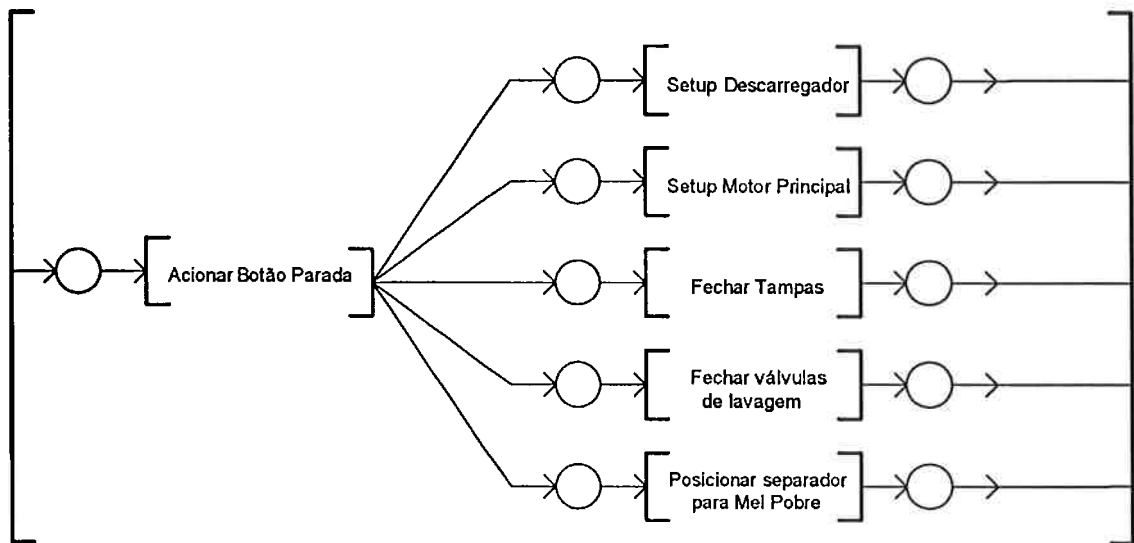


Fig. D.22 Modelo PFS da atividade /Setup Atuadores.

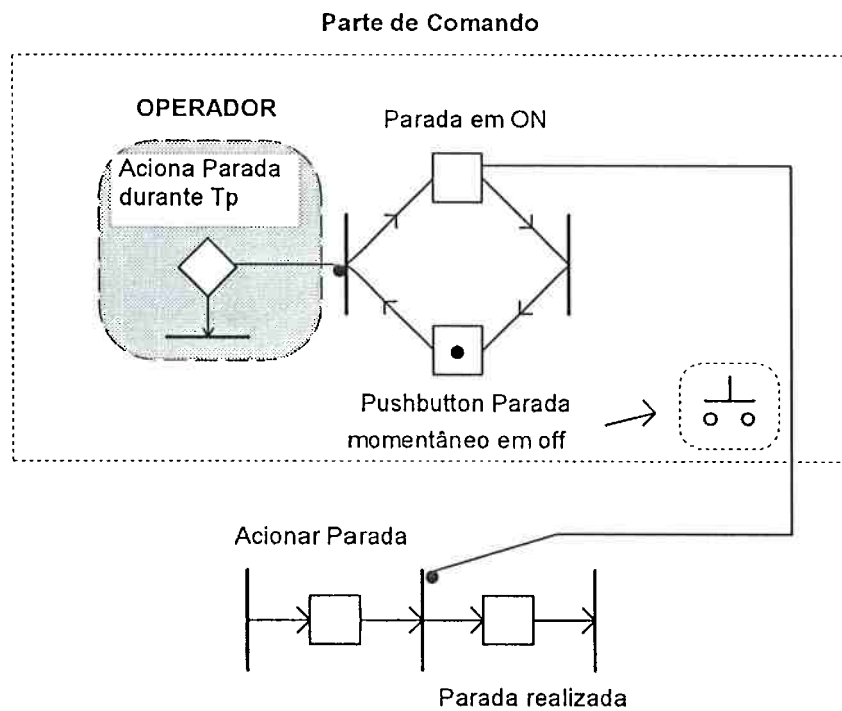


Fig. D.23 Conexão do modelo da atividade /Acionar Botão Parada com a parte de comando.

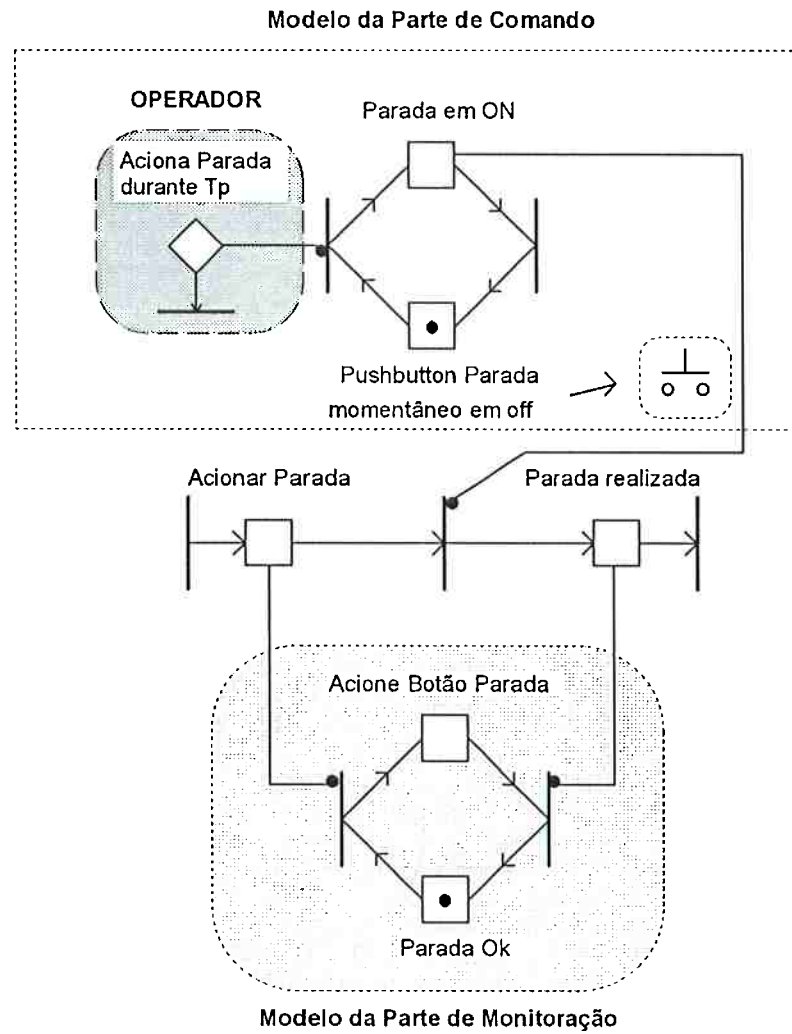


Fig. D.24 Conexão do modelo da atividade com a parte de comando e monitoração

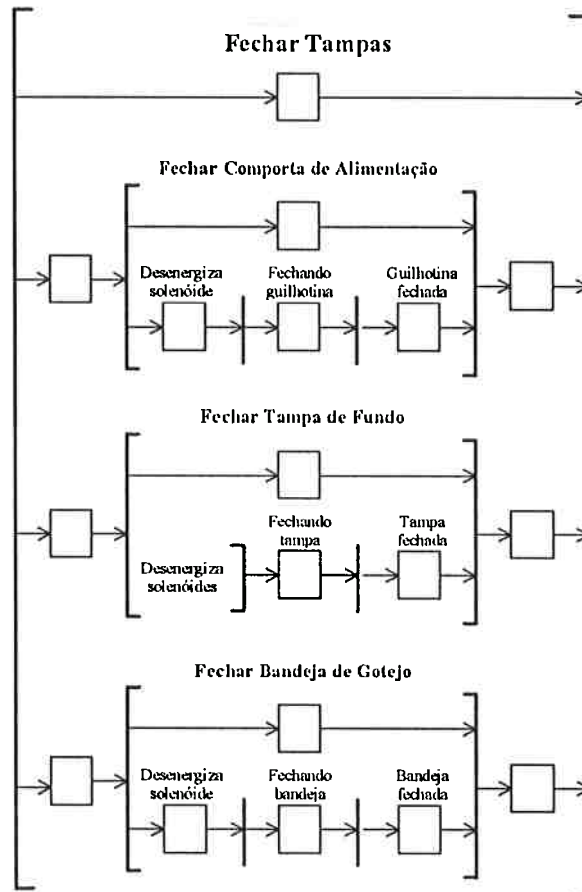


Fig. D.25 Modelo da atividade *Fechar Tampas*



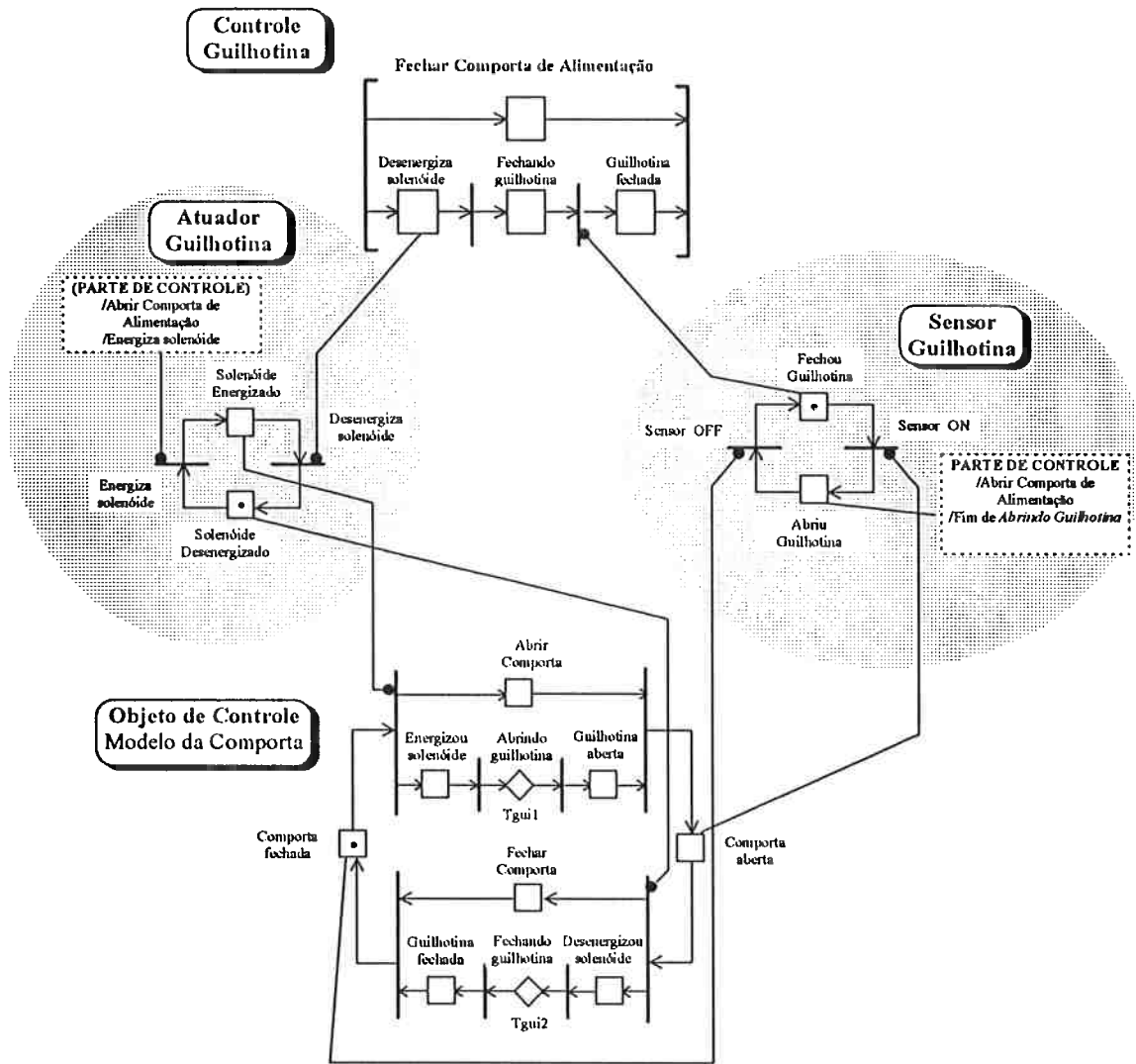


Fig. D.26 Modelo da atividade *Fechar Comporta do Alimentador*

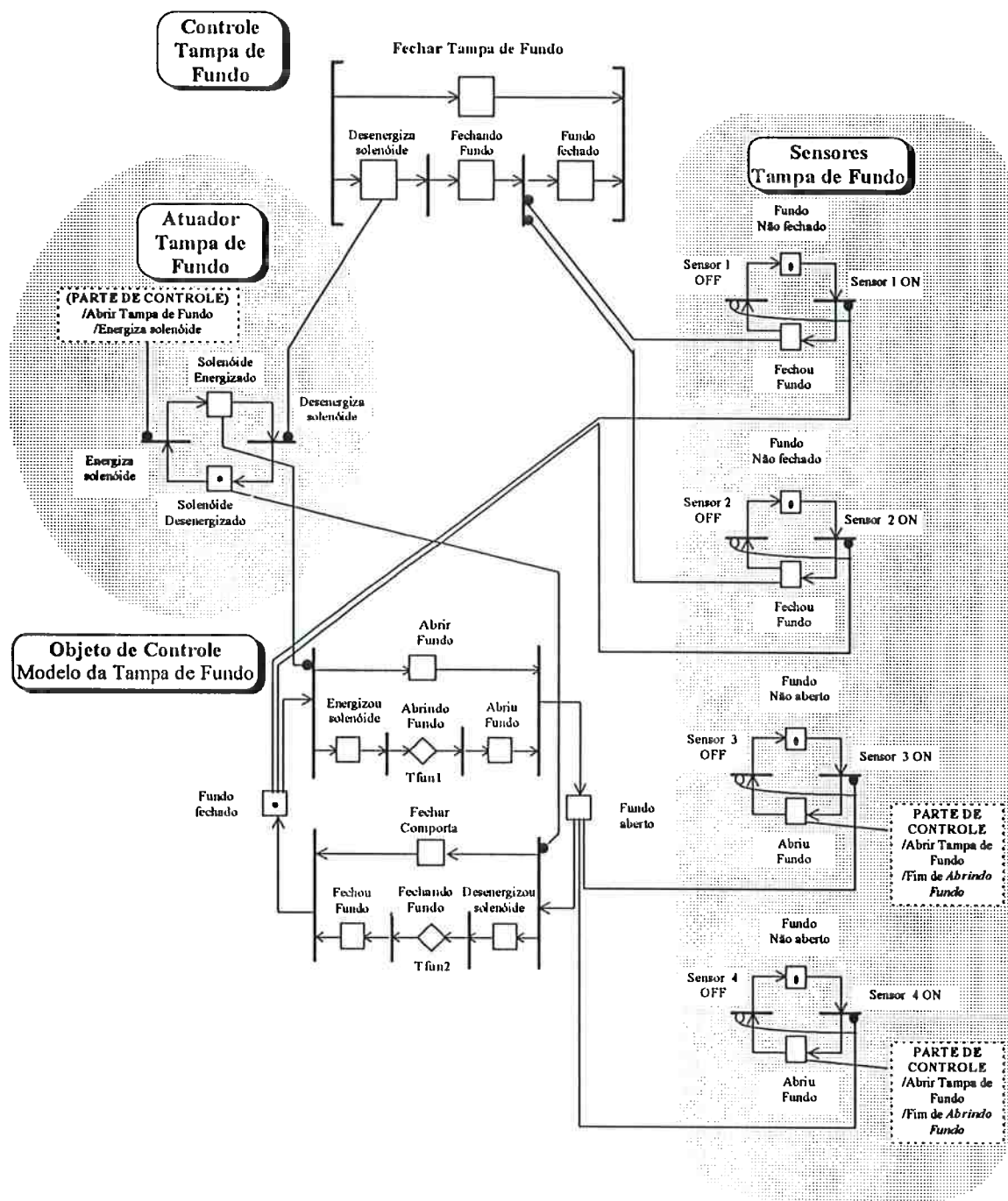
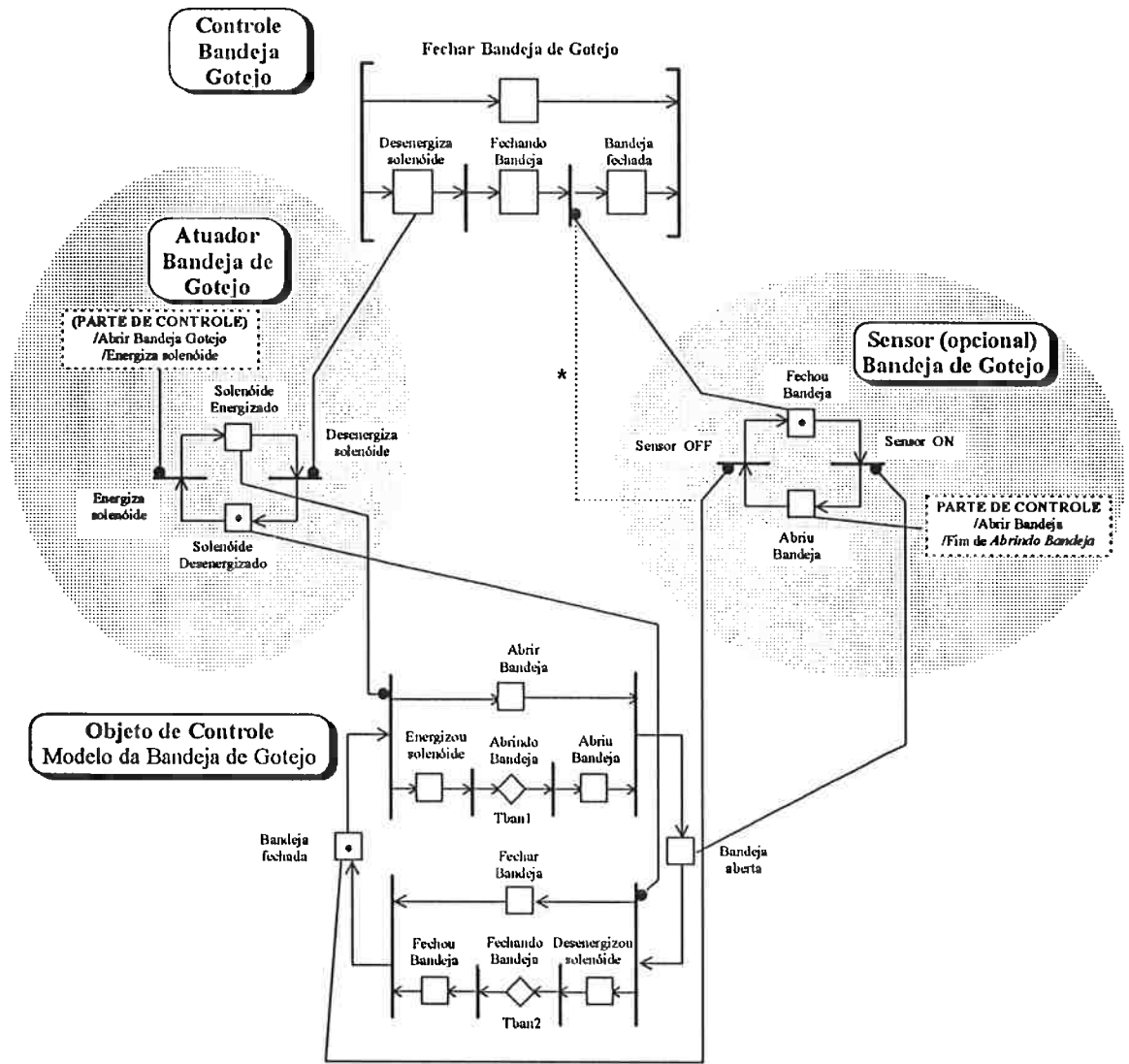


Fig. D.27 Modelo da atividade *Fechar Tampa de Fundo*



\*Obs. A linha tracejada corresponde à situação em que não há sensor.

Fig. D.28 Modelo da atividade *Fechar Bandeja de Gotejo*

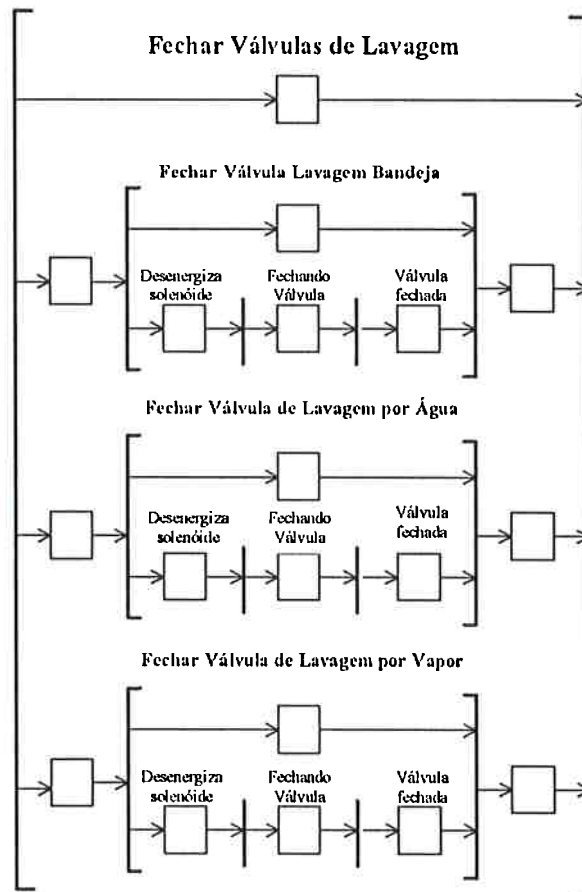


Fig. D.29 Modelo da atividade *Fechar Válvulas de Lavagem*

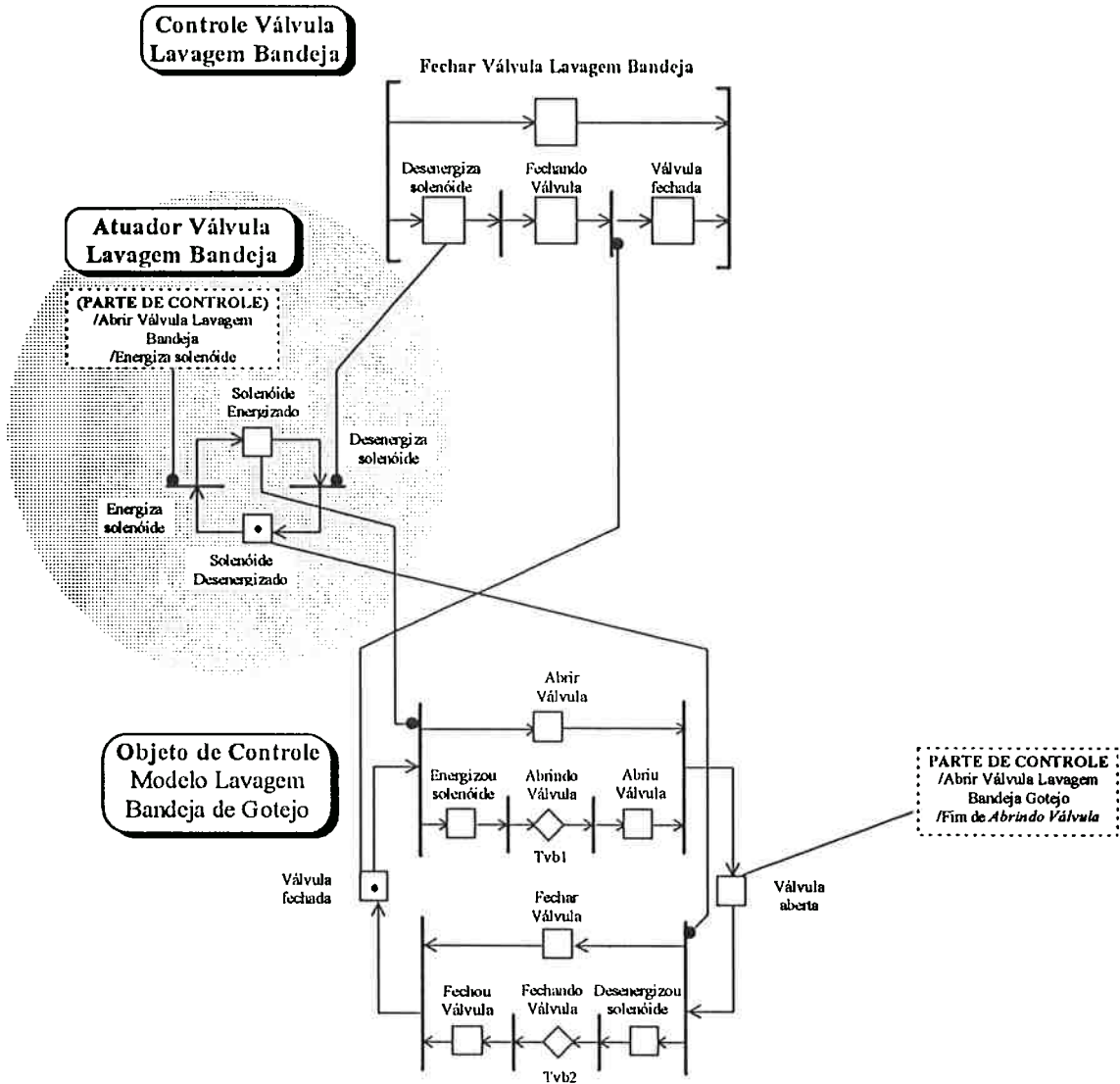


Fig. D.30 Modelo da Atividade *Fechar Válvula da Lavagem da Bandeja de Gotejo*

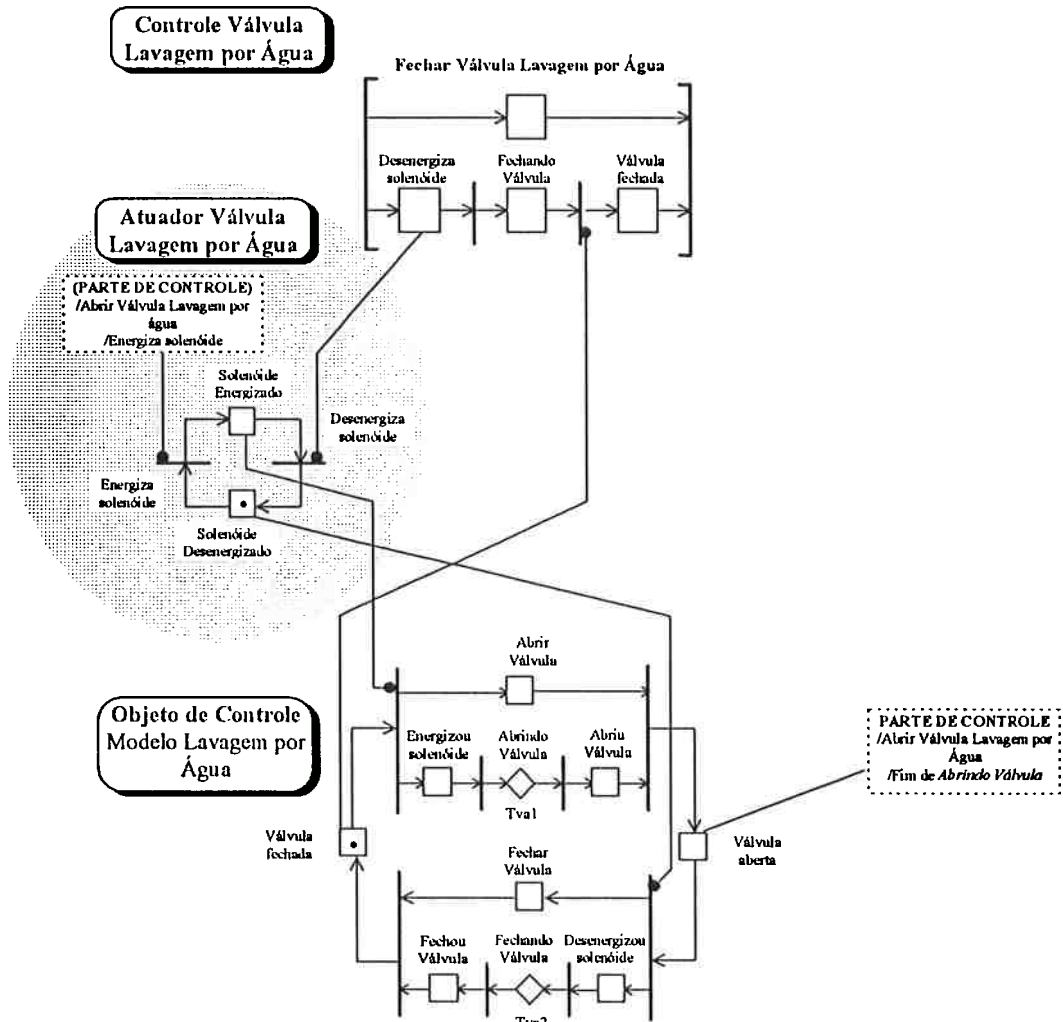


Fig. D.31 Modelo da Atividade *Fechar Válvula de Lavagem por Água*

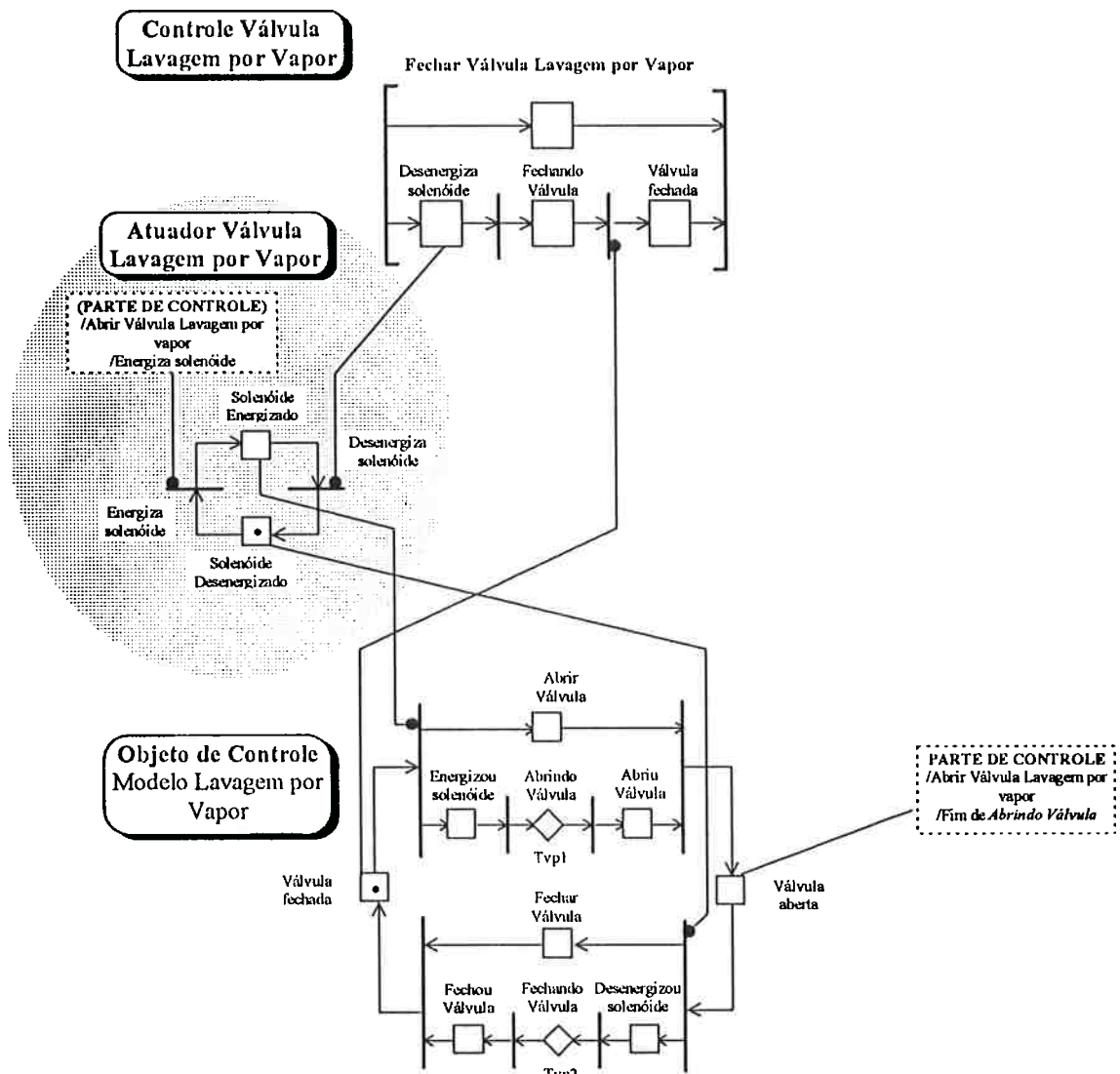


Fig. D.32 Modelo da Atividade *Fechar Válvula de Lavagem por Vapor*

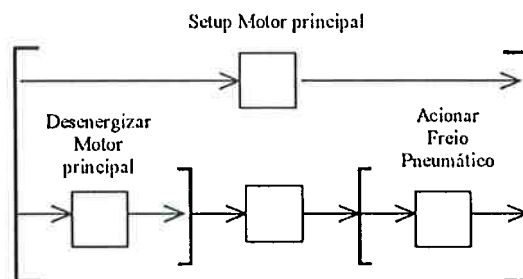


Fig. D.33 Modelo da Atividade *Setup do Motor Principal*



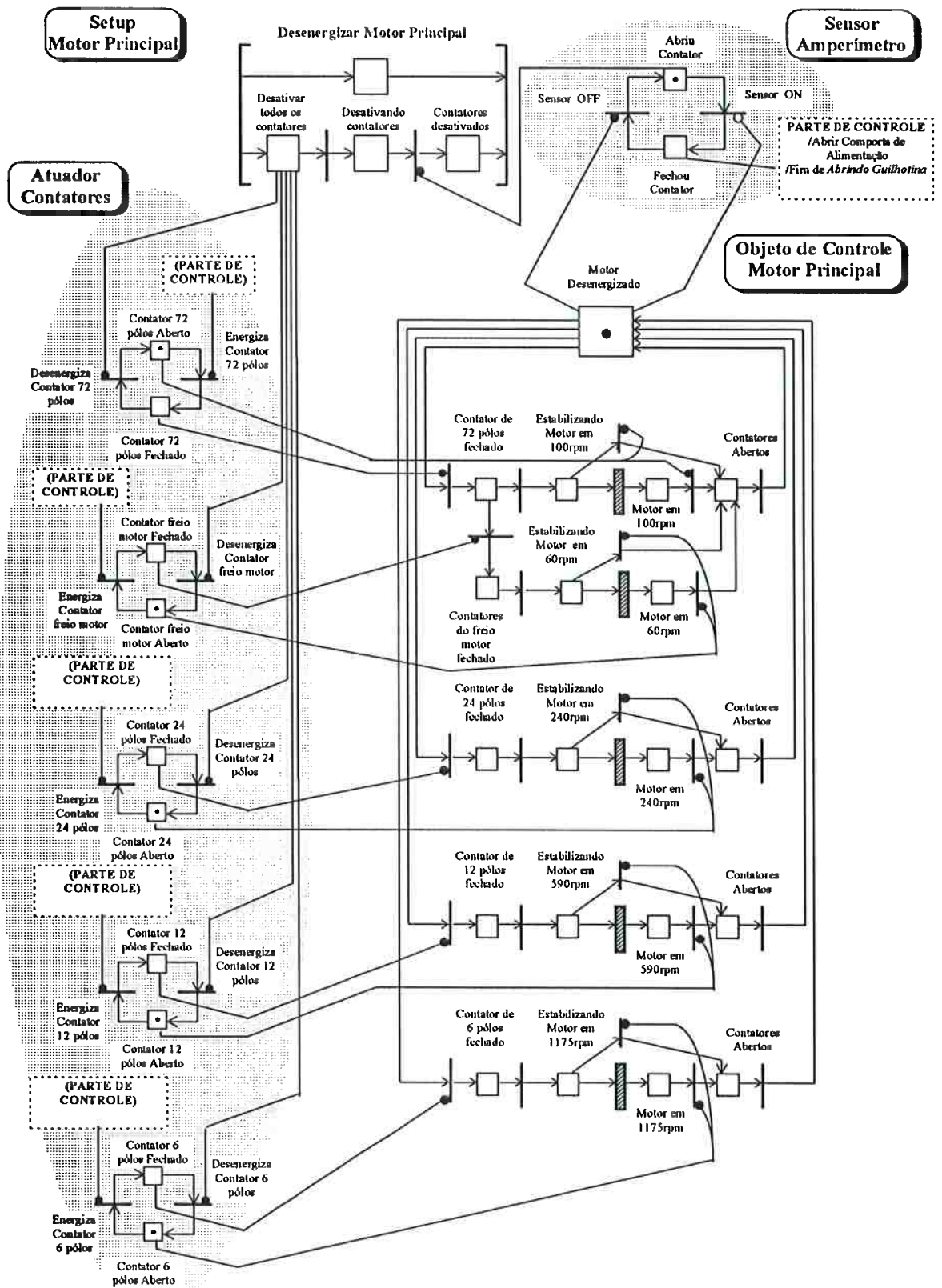


Fig. D.34 Modelo da Atividade *Setup do Motor Principal \ Desenergizar Motor Principal*



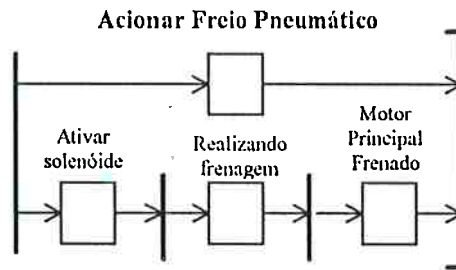


Fig. D.35 Modelo da Atividade *Setup do Motor Principal \ Acionar Freio Pneumático*

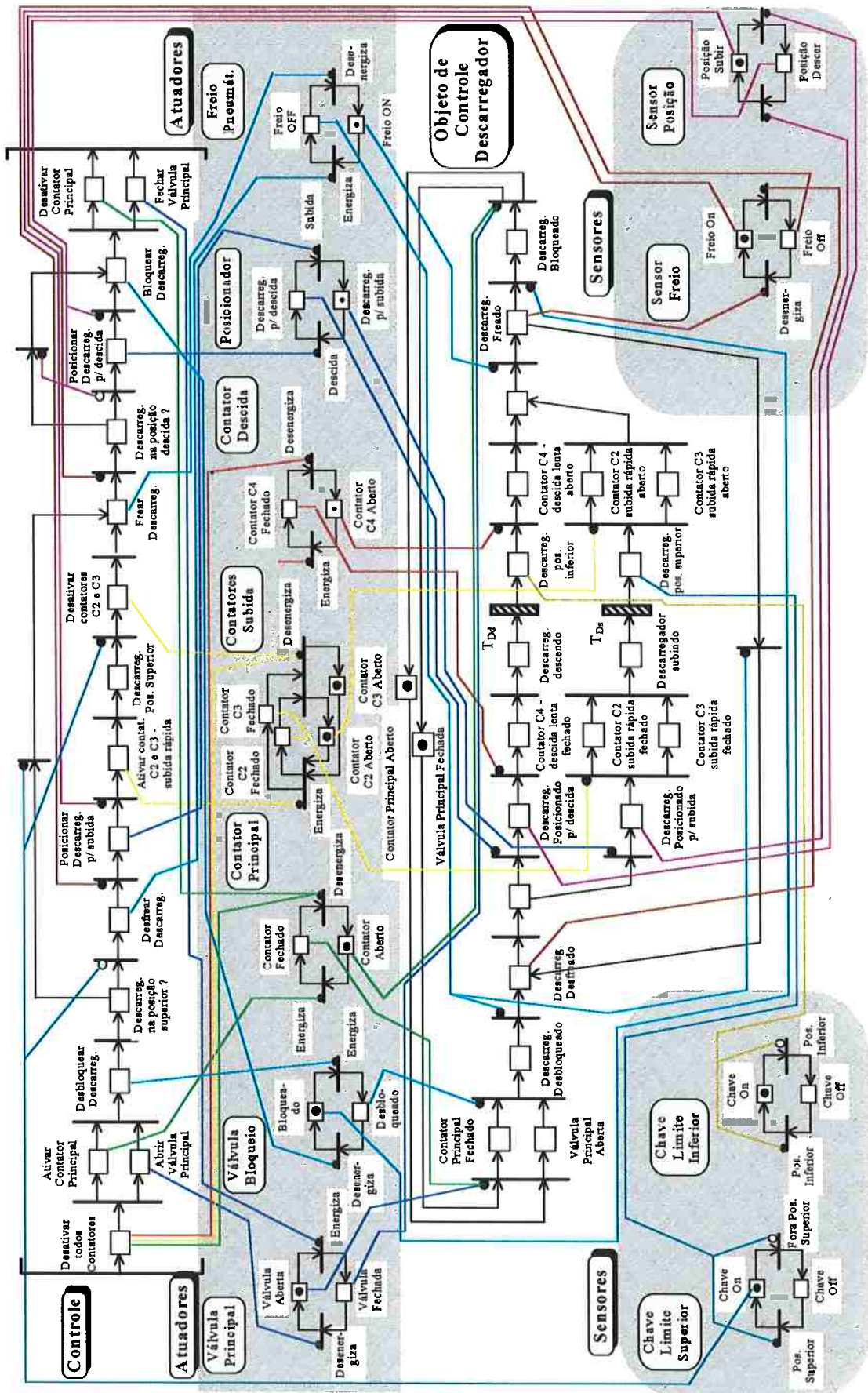


Fig. D.36 Modelo da Atividade *Posicionamento Descarregador \ Subida Repouso*

#### D.4 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES

Esta técnica permite uma análise das partes do modelo e do modelo global por simulação fornecendo uma variedade de resultados exemplificados a seguir:

- Representação efetiva do objeto de controle a partir de modelos E-MFG que podem ser reutilizados para outro estudo de caso.
- Modelagem do fluxo vertical de informações entre as partes do sistema permitindo uma representação adequada dos sinais de interfaceamento entre os vários dispositivos que integram o objeto de controle.
- Avaliação do sistema de controle, isto é, das estratégias de controle e dos vários intertravamentos propostos a partir da simulação dos *modelos E-MFG* da parte operativa (objeto de controle) sincronizados ao *modelo E-MFG* da parte de controle;
- Avaliação do impacto causado pela ocorrência de uma determinada falha na planta em relação ao sistema de controle;
- Análise do índice de desempenho do sistema em função da aplicação de uma determinada estratégia de controle, sendo útil, portanto, para avaliar-se outras alternativas de realização do processo que possam ser mais adequadas às necessidades de cada cliente.
- Viabilização do desenvolvimento e avaliação de recursos de auto-diagnóstico para a detecção de falhas durante um processo. As falhas podem ser geradas durante a simulação do modelo e, por conseguinte, a resposta do sistema de

controle pode ser avaliada exaustivamente, permitindo a atualização local de estratégias de controle para controlar as falhas em questão.

Os procedimentos de Projeto, Desenvolvimento e Teste do 'software' de controle foram conduzidos por consultores independentes segundo um acordo comercial e assim não podem ser apresentados aqui. Entretanto, pode-se afirmar que os resultados em termos, principalmente, da operacionalidade e manutenção do sistema, comprovam a efetividade e importância do procedimento adotado.

## BIBLIOGRAFIA

- BAIRD, S. P.; LEAVY, J., J. Simulation Modeling Using Promodel for Windows. In: 1994 Winter Simulation Conference. **Proceedings**. WSC'94, New York, NY, p.527-32, 1994.
- BAKER, K.P. **Introduction to Sequencing and Scheduling**. New York, John Wiley and Sons, 1974.
- BANASZAK, Z.A.; KROGH, B.H. Deadlock avoidance in Flexible Manufacturing Systems with concurrently competing process flows. **IEEE Transaction on Robotics and Automation**, v.6, n.6, p.724-34, 1990.
- BANASZAK, Z.A.; Modeling and Control of FMS Petri Net Approach, Wroclaw Technical University Press, 1991.
- BANERJEE P. et al. A Modelling of Interactive Layout Designer Reasoning using Qualitative Patterns. **International Journal of Production Research**, v.30, n.3, p.433-53, 1992.
- BANKS, J. Software for Simulation In: 1995 Winter Simulation Conference. **Proceedings**. WSC'95, Arlington, VA, p.32-8, 1995.
- BERRY, G.; GONTHIER, G. The Esterel Synchronous Programming Language: design, semantics, implementation. **Science of Computer Programming**, vol.19, n.2, p.83-152, 1992.
- BITTAR, R.C.S.M. **A Utilização do Grafcet como Ferramenta na Automação Industrial**. S. Paulo, 1993. Dissertação (Mestrado) - UNICAMP.
- BRONSON, R. **Pesquisa Operacional** São Paulo, 1.ed. McGraw-Hill do Brasil, 1985.
- BUCK, B.; MACAULAY, V.A. **Maximum Entropy in Action**. New York, Oxford University Press, 1991.
- CALLIOLI, C.A. et al. **Álgebra Linear e Aplicações**, São Paulo, Atual Editora, 2a.ed., 1978.
- CHWIF, L. **Uma Metodologia para Auxiliar o Planejamento do Arranjo Físico de Indústrias de Manufatura: Base para Sistemas**

- Computadorizados.** S. Paulo, 1994. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de S. Paulo.
- CHO, H. et al. Graph-Theoretic Deadlock Detection and Resolution for Flexible Manufacturing Systems. **IEEE Transaction on Robotics and Automation**, v.11, n.3, p.413-21, 1995.
- COFFMAN et al. System Deadlocks. **ACM Comput. Surveys**, v.3, n.2, p.67-78, 1971.
- DAS, S.K. A Facility Layout Method for Flexible Manufacturing Systems. **Internacional Journal of Production Research**, v.31, n.2, p.279-97, 1993.
- DAVID, R.; ALLA, H. **Petri nets and Grafcet: tools for modelling Discrete Event Systems.** Prentice Hall, London, 1992.
- DAVID, R.; ALLA, H. Petri Nets for Modeling of Dynamic Systems - A Survey. **Automatica**, v.30, n.2, p.175-201, 1994.
- DiCESARE et al. **Practice of Petri Nets in Manufacturing.** London, Chapman & Hall, 1995.
- DILTS, D.M. et al. The evolution of control architecture automated manufacturing system. **Journal of Manufacturing Systems**, n.10, p.79-93, 1991.
- DOUMEINGTS, G. et al. From CIM to global manufacturing. In: CAPE'95 COMPUTER APPLICATIONS in PRODUCTION AND ENGINEERING. **Proceedings.** IFIP, Beijing, China, p.379-88, 1995.
- DYNNIKOV, V. et al. Scheduling de Veículos Autônomos de Transporte em Sistemas de Manufatura Flexível. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 3., Espírito Santo, 1997. **Anais.** Vitória, UFES, 1997. p.123-8.
- EZPELETA, J. et al. A Petri net based deadlock prevention policy for Flexible Manufacturing Systems. **IEEE Transactions on Robotics and Automation** v.11, n.2, p.173-84, 1995.
- FUJI ELETRIC & FUJI-FACOM Control, Material Flow System Control (Finet), **Journal Of the Society of Instrument and Control Engineers**, v.28, n.9, p.826-827, Tokyo, Japan, 1989.
- GENRICH, H.J. Predicate/Transition Nets. In: Brauer, W.; Reisig, W. and Rozemberg, G., editors, **Petri Nets: Central Models and their Properties**, v.254 of **Lecture Notes in Computer Science**, p.207-47, Springer-Verlag, 1987.
- GENRICH, H.J.; LAUTENBACH, H. System Modeling with High Level Petri Nets. **Theoretical Computer Science**, v.13, p.109-36, 1981.



- GEORGEFF, M.P.; LANSKY, A.L. Reactive Reasoning and Planning. In: ALLEN, J. **Readings in Planning**. California, Morgan Kaufmann Publishers, 1990. p.729-34.
- GOETSCHALCHX, M. An Interactive Layout Heuristic Based on Hexagonal Adjacency Graphs. **European Journal of Operational Research**, v.63, n.2, p.304-21, 1992.
- GOMES, L.F.S. **Redes de Petri Reactivas e Hierárquicas - Integração de formalismos no projecto de sistemas reactivos de tempo-real**. Lisboa, 1997. Tese Doutorado - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- GONG, D.C.; HSIEH, Y.W. Conceptual design of a shop floor control information system. **Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v.1, p.4-16, 1997.
- GROOVER, M.P. **Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing**. New Jersey, Prentice Hall Internacional, 1987.
- GUNASEKARAN, A. Integration and adaptability issues. **Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v.1, p.1-3, 1997.
- HAKEN, H. **Information and Self-Organization A Macroscopic Approach to Complex Systems**. Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física**. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., v.1, 1a. ed., 1981.
- HARARI, F. **Graph Theory**, Philippines, Addison-Wesley Publishing Company, 2nd. ed., 1971.
- HASEGAWA, K. et.al., Proposal of Mark Flow Graph for Discrete System Control, **Trans. of SICE**, v.20, n.2, p.122-129, 1984.
- HASEGAWA, K. et al. Graphical Analysis and Synthesis of in Flexible Manufacturing Systems. In: 17th International Conference on Application and Theory of Petri Net, **Proceedings**. First International Workshop, Osaka, Japan, p.161-176, 06/1996a.
- HASEGAWA, K. Modeling, control and deadlock avoidance of flexible manufacturing systems. In: 11° CBA - CONGRESSO BRASILEIRO de AUTOMÁTICA, **Anais**. SBA, São Paulo, SP, v.I, p.37-51, 09/1996.
- HASEGAWA, K. et al. Transform of discrete production net request/allocation graph. In: '96 Joint Symposium on System and Information, **Proceedings**. SICE, Matsuyama, Japan, p.213-18, 10/1996b (in Japanese).

- HASEGAWA, K. et al. Deadlock avoidance policy based on request/allocation graph. In: '96 Joint Symposium on System and Information, **Proceedings**. SICE, Matsuyama, Japan, p.219-24, 10/1996c (in Japanese).
- HILLIER, F.S. Quantitative Tools For Plant Layout Analysis, **Journal of Industrial Engineering**, v.14, p.33-40, 1963.
- HIRSCH, B.E. et al. Decentralized and collaborative production management - a prerequisite for globally distributed manufacturing. In: CAPE'95 COMPUTER APPLICATIONS in PRODUCTION AND ENGINEERING. **Proceedings**. IFIP, Beijing, China, p.679-88, 1995.
- HO, Y.C. Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems. **Proc. of IEEE**, v.77, p.3-6, 1989.
- HSIEH, F.S., Chang, S.C. Dispatching driven deadlock avoidance controller synthesis for flexible manufacturing systems, **IEEE Trans. of Robotics and Autom.**, v.10, n.2, p.196-209, 1994.
- HUBER, P. et al. Hierarchies in Coloured Petri Nets. In Jensen, K.; Rozenberg, G. Editors, **High Level Petri Nets: Theory and Application**, p.313-41. Springer-Verlag, 1991.
- INAMUSU, R. Y. **Modelo de FMS: uma Plataforma para Simulação e Planejamento**. São Paulo, 1995. Tese Doutorado - Escola de Eng. de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ITO, Y. A diserable production structure looking toward the 21st century - Anthropocentric Intelligence-Based Manufacturing. In: XI COBEM. **Anais**. Brazil, S. Paulo, p.23-32, 1991.
- JENSEN, K. **Coloured Petri Nets: A High Level Language for System Design and Analysis**. In **Advances in Petri Nets**, v.483 of **Lecture Notes in Computer Science**. Springer-Verlag, 1990.
- JIN, D. et al. The determination of AGV's traffic control model by ID3 through an implicit knowledge learning. In: CAPE'95 COMPUTER APPLICATIONS in PRODUCTION AND ENGINEERING. **Proceedings**. IFIP, Beijing, China, p.679-88, 1995.
- KITTEL, et al. **Mecânica - Curso de Física de Berkeley**. S. Paulo, Edgard Blücher Ltda., 1980.
- KOVÁCS, I.; MONIZ, A. B. Issues on the anthropocentric production systems. In: Internacional Conference on Architectures and Design Methods for Balanced Automation Systems, **Proceedings**. Ed. by CAMARINHAMATOS, L.M.; AFSARMANESH, H. **Balanced Automation Systems Architectures and Design Methods**, Chapman & Hall, p.131-40, 1995.



- LE BAIL et al. Hybrid Petri Nets. In: 1st. European Control Conf., **Proceedings**. Grenoble, p.1472-77.
- LEE, D.Y.; DiCESARE, F. Scheduling Flexible Manufacturing Systems Using Petri Nets and Heuristic Search. **IEEE Transaction on Robotics and Automation**, v.10, p.123-32, 1994.
- LEE, D.Y.; DiCESARE, F. Petri Net-Based Heuristic Scheduling for Flexible Manufacturing. In: ZHOU, M. **Petri Nets in Flexible and Agile Automation**. Norwell - Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1995. p.149-88.
- LI, S. et al. Scheduling and Rescheduling of AGVs for Flexible and Agile Manufacturing. In: ZHOU, M. **Petri Nets in Flexible and Agile Automation**. Norwell - Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1995. p.189-206.
- LIGGET, R.S. The quadratic assignment problem. **Management Science**, v.27, n.4, p.442-58, 1981.
- LANGDON, G.G.; FREGNI, E. **Projeto de Computadores Digitais**. São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda., 2.ed., 1977.
- MARCONCINI, R.C.S.; ROSÁRIO, J.M. Simulação de um Sistema Automatizado a partir da Utilização das Técnicas do GRAFCET. In XII COBEM - CONGRESSO BRASILEIRO de ENGENHARIA MECÂNICA, **Anais**, ABCM, Brasília, DF, p.1743-46, 1994.
- MIYAGI, P.E. **Control System Design, Programming and Implementation for Discrete Event Production Systems by using Mark Flow Graph**, Japan, 1988. Tese de Doutorado - Tokyo Institute of Technology.
- MIYAGI, P.E et al. The Application of Enhanced Mark Flow Graph in Real Time Control Systems. In: IFAC 4th SYMPOSIUM on LOW COST AUTOMATION, **Preprints**. IFAC/AADECA, Buenos Aires, Argentina, p.163-170, 1995.
- MIYAGI, P.E. et al. A Design Methodology of Control Systems for Industrial Applications Based on Petri Nets. In: MECHATRONICS'96 the 5<sup>th</sup> UK MECHATRONICS FORUM INTERNATIONAL CONFERENCE and M2VIP'96 the 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE on MECHATRONICS and MACHINE VISION in PRACTICE. **Proceedings**, IEE/IMechE/, Guimarães, Portugal, v.1, p.385-390, 09/1996.
- MIYAGI, P.E. **Controle Programável - Fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**. S. Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda., 1996.
- MIYAGI, P.E. et al. Modelagem e Análise de Sistemas Complexos com Recursos Compartilhados Através do PFS (Production Flow Schema), In:

- 12° CBA - CONGRESSO BRASILEIRO de AUTOMÁTICA, **Anais**. SBA, Uberlândia, MG, 1998. /No prelo/
- MORANDIN, J.O. **Projeto e construção de um veículo auto-guiado para sistemas flexíveis de manufatura**. São Carlos, 1994. Dissertação (Mestrado) - E. E. S. Carlos, Universidade de S. Paulo.
- MORTON, T.E. et al. **Heuristic Scheduling Systems**. New York, John Wiley and Sons, 1993.
- MURATA, T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, **Proceedings of the IEEE**, v.77, n.4, p.541-80, 1989.
- MUTHER, R. **Planejamento do layout - sistema SLP**. S. Paulo, Edgard Blücher Ltda., 1969.
- NOVAES, A.G. **Métodos de Otimização. Aplicações ao Transporte**. S. Paulo, Edgard Blücher Ltda., 1978.
- PAPOULIS, A. **Probability, Random Variables, and Stochastic Processes**, McGraw-Hill Int. Editions, 1984.
- PERKUSICH, A. **Análise de Sistemas Complexos Baseada na Decomposição de Sistemas de G-Nets**. Paraiba, 1994. Tese de Doutorado - Universidade Federal da Paraiba.
- PETERSON, J.L., **Petri Net Theory and the Modeling of Systems**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1981.
- PETERSON, J.L.; SILBERSCHATZ, A. **Operating System Concepts**. Addison-Wesley, 1985.
- POLITANO, P.R. et al. Regras de Produção Nebulosas (Fuzzy) na Programação para Job-shop. In: **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2.**, Paraná, 1995. **Anais**. Curitiba, CEFET, 1995. p.171-6.
- PRADO, J.P.A. et al. Inteligência Artificial Distribuída em Ambientes Reativos. In: **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 1.**, São Paulo, 1993. **Anais**. Rio Claro, UNESP, 1993. p.327-38.
- PRESSMAN, R.S. **Software Engineering A practitioner's Approach**, New York, McGraw-Hill, 3rd ed., 1992.
- PUCCINI, A.L.; PIZZOLATO, N.D. **Programação Linear**, S.Paulo, Livros Téc. Cient. Ed. S.A., 1987.
- REISIG, W. **Petri Nets: An Introduction**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1985.

- REISIG, W. **A Primer in Petri Nets Desing**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.
- REVELIOTIS, S.A.; FERREIRA, P.M. Deadlock avoidance policies for automated manufacturing cells. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**. v.12, n.6, 1996.
- RICH, E.; KNIGHT, K. **Inteligência Artificial**. São Paulo, MAKRON Books do Brasil Editora Ltda., 2a. ed., 1994.
- SAHNI, S.; GONZALES, T. P-complete approximation problems. **Journal of Associated Computing Machinery**, v.23, n.5, p.555-65, 1976.
- SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E., Sistemas de Eventos Discretos e seu Controle. In: 1º COBISA/CINISA, **Anais ISA International**, São Paulo, SP, p.2.1-12, 05/1991.
- SANTOS FILHO, D.J. **Proposta do Mark Flow Graph Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas Integrados de Manufatura**. S. Paulo, 1993. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de S. Paulo.
- SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P.E. Realização de Controle de Tarefas de Veículos Autônomos de Transporte Através do MFG Estendido com Marcas Individuais. In: 6º CONAI - CONGRESSO NACIONAL de AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, **Anais**. SUCESU-SP/Automática, São Paulo, SP, 1994.
- SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P.E. Enhanced Mark Flow Graph to Control Flexible Manufacturing Systems. **Jornal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences**, ABCM, Rio de Janeiro, RJ, v.17, n.2, p.232-248, 1995a.
- SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P.E. Enhanced Mark Flow Graph to Control Autonomous Guided Vehicle. In: CAPE'95 COMPUTER APPLICATIONS in PRODUCTION AND ENGINEERING. **Proceedings**. IFIP, Beijing, China, p.856-865, 1995b.
- SANTOS FILHO et al. Proposta de uma Ferramenta Computacional para Análise de Grafos E-MFG por Simulação. In: 11º CBA - CONGRESSO BRASILEIRO de AUTOMÁTICA, **Anais**. SBA, São Paulo, SP, v.II, p.689-694, 09/1996.
- SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P.E. Automação de um Sistema de Rampa para Embarque e Desembarque de Veículos em Navios. In XIV COBEM - CONGRESSO BRASILEIRO de ENGENHARIA MECÂNICA, **Anais**, CD-ROM. ABCM, Bauru, SP, 12/1997a.
- SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P.E. Proposta de uma Ferramenta Automática de Programação de CPs a partir de Modelos MFG. In XIV

- COBEM - CONGRESSO BRASILEIRO de ENGENHARIA MECÂNICA, **Anais**, CD-ROM. ABCM, Bauru, SP, 12/1997b.
- SHIH, L.C. **AI search techniques and applications to production management problems**. Tokyo, 1991. Doctor Thesis. Dept. of Industrial Engineering and Management. Tokyo Institute of Technology.
- SHIH, L.C. et al. An AI search technique based layout planning method. **International Journal of Production Research**, v.30, n.12, p.2839-55, 1992.
- SILVA, J.R.; SHIMADA, L.M. Um Sistema de Planejamento Semi-Reativo para Sistemas de Produção Baseado em Redes de Petri. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2. , Paraná, 1995. **Anais**. Curitiba, CEFET, 1995. p.171-6.
- SILVA, M. **Las Redes de Petri: en la Automática y la Informática**. Madrid, Editorial AC, 1985.
- TAM, K.Y.; LI, S.G. A Hierarchical Approach to the Facility Layout Problem. **International Journal of Production Research**, v.29, n.1, p.165-84, 1991.
- TEDESCHI, S.G.G. **Seleção de Meta-Regras para Alteração Dinâmica do Despacho da Produção**. S. Paulo, 1997. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de S. Paulo.
- VALETTE, R., Nets in production systems, **Lecture Notes in Computer Science**, Springer Verlag, p.191-217, 1986.
- VALLE, R. et al. Computer Integrated Manufacturing: Aspectos Organizacionais. **Jornal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences**, ABCM, Rio de Janeiro, RJ, v.17, n.2, p.190-200, 1995.
- VISWANADHAM, N. et al. Deadlock prevention and deadlock avoidance in Flexible Manufacturing Systems using Petri net models. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v.6, n.6, p.173-84, 1990.
- XING, K. et al. Deadlock avoidance policy for Flexible Manufacturing Systems. In: ZHOU, M. **Petri Nets in Flexible and Agile Automation**. Norwell - Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1995. p.239-62.
- XING, K. et al. Deadlock avoidance policy for Petri-net modeling of Flexible Manufacturing Systems with shared resources. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v.41, n.2, p.289-95, 1996.
- YOSHIDA, S. **Tagged MFG Based Control Of Materials Flow in Job-Shop Production Systems**, Dissertação de Mestrado, Tokyo Institute of Technology, Japan, 1988.

WANKE, P. A logística de suprimientos just-in-time. **Tecnológica**, n.11, p.30-4, 1996.

ZHOU, M. et al. A Hybrid methodology for synthesis of Petri net models for manufacturing systems, **IEEE Trans. of Robotics and Automation**, v.8, n.3, p. 350-61, 1992.