

BC

FD-1482

DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO

**PROPOSTA DO MARK FLOW GRAPH ESTENDIDO
PARA A MODELAGEM E CONTROLE DE SISTEMAS
INTEGRADOS DE MANUFATURA**

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

São Paulo
1993

DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO

Nº Func. 433284

**PROPOSTA DO MARK FLOW GRAPH ESTENDIDO
PARA A MODELAGEM E CONTROLE DE SISTEMAS
INTEGRADOS DE MANUFATURA**

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

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi**

Nº Func. 396451

**São Paulo
1993**

*À minha Espôsa em sinal de meu perpétuo amor e
dedicação e à minha Família por tudo, em especial pelo
carinho de minha querida Mãe.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por mais esta oportunidade em minha vida.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi pela dedicação, paciência e exemplo de vida demonstrados durante estes anos.

Ao Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato pelo apoio e confiança depositados em minha pessoa.

Ao grande amigo Eng. Júlio Arakaki sempre atento, mostrando empenho e dedicação em todos os momentos.

A todos amigos da Mecatrônica minha eterna gratidão por tudo.

SUMÁRIO

Resumo

"Abstract"

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 A Evolução dos Sistemas de Manufatura	1
1.2 A Aplicação de Redes de Petri	4
1.3 Motivações do Trabalho	7
2 FLEXIBILIDADE E O AMBIENTE DE MANUFATURA	11
2.1 Introdução	11
2.2 Comportamento Dinâmico dos SVCs	12
2.3 Comportamento Dinâmico dos SEDs	13
2.4 Manufatura Flexível	16
2.4.1 Conceituação	18
2.4.2 Flexibilidade e a Organização dos Sistemas Produtivos.....	19
2.4.3 A Organização Estrutural dos Sistemas Integrados de Manufatura (SIM)	21
2.4.4 Composição Funcional e Hierarquia	24
2.4.4.1 Nível de Chão de Fábrica	26
2.4.4.2 Nível de Estações de Trabalho	26
2.4.4.3 Nível de Células de Manufatura e Linhas Flexíveis	27
2.4.4.4 Nível de SIM	28
2.4.5 Comportamento Dinâmico de um SIM	28
2.5 SIMs e os Sistemas Antropocêntricos	32
3 TÉCNICA DE MODELAGEM DE SIMs BASEADAS EM MFG	35
3.1 Introdução	35
3.2 Mark Flow Graph (MFG)	37
3.2.1 Elementos Estruturais e suas Inter-Relações	37
3.2.2 A Dinâmica das Marcas no Grafo MFG	39
3.2.3 Relações de Concorrência e Conflito	41

3.2.4 Seqüenciamento e Simultaneidade de Eventos	42
3.2.5 Segurança ("Safeness")	44
3.2.6 Elementos Temporizados	44
3.2.7 "Deadlock" e "Liveness" no MFG	45
3.3 O MFG Funcional (F-MFG)	46
3.3.1 O "Box" Capacidade	47
3.3.2 O "Box" Agrupador	48
3.3.3 O "Box" Dispersor	49
3.3 Production Flow Schema (PFS).....	49
3.4.1 Os Elementos Atividade e Distribuição	51
3.4.2 Representação dos Elementos PFS em MFG	54
3.4.3 Modelagem da Hierarquia Funcional	55
4 MARK FLOW GRAPH ESTENDIDO (E-MFG)	59
4.1 Introdução	59
4.2 A Flexibilidade do F-MFG	60
4.3 OS Elementos Estruturais do E-MFG	64
4.3.1 As Marcas Individuais	66
4.3.2 As Marcas Compostas	67
4.3.3 A Modularização do E-MFG	68
4.3.3.1 "Box" Capacidade	69
4.3.3.2 "Box" Agrupador	70
4.3.3.3 "Box" Dispersor	71
4.3.3.4 "Box" Controlador	72
4.3.3.5 "Box" Temporizador	72
4.4 Comportamento Dinâmico da Marcação	72
4.4.1 Manutenção dos Atributos da Marcas Individuais	72
4.4.2 As Inscrições nas Transições	74
4.4.3 Dinâmica das Regras de Disparo	74
4.5 A Flexibilidade do E-MFG	77
5 ESPECIFICAÇÃO DO CONTROLE DE SISTEMAS INTEGRADOS DE MANUFATURA	80
5.1 Introdução	80
5.2 Controle Qualitativo e Controle Quantitativo	81
5.3 Estrutura do Sistema de Controle	86

5.4 A Hierarquia de Controle de SIMs	89
5.5 Modelagem do Sistema de Controle	91
5.6 Uma Metodologia para Especificação do Controle	96
5.6.1 O E-MFG e a modelagem de SIMs	96
5.6.2 Modelo Conceitual do Vetor de Atributos	98
5.6.3 A Metodologia E-MFG/PFS	100
5.6.4 Alocação de Recursos em E-MFG	102
5.6.5 Procedimentos para a Especificação do Controle	
Adicional	104
5.6.5.1 Controle do Início e Término de cada Atividade	104
5.6.5.2 Sincronização de Atividades	105
5.6.5.3 Arbitração de Conflitos	106
5.6.5.4 Controle do Número Máximo de Ítems	108
6 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E-MFG/PFS PARA O CONTROLE DE	
VATs	110
6.1 Introdução	110
6.2 Especificação de um Sistema de Manufatura	111
6.2.1 Estrutura	112
6.2.2 Comportamento Dinâmico	112
6.3 Composição do Vetor de Atributos	113
6.4 Modelo do Objeto de Controle	115
6.4.1 Modelo da Via de Transporte	116
6.4.2 O Elemento '[Atividade Est.n]'	118
6.4.3 O Elemento '[Atividade Est.in]'	121
6.4.4 O Elemento '[Atividade Est.out]'	121
6.4.5 O Elemento '[Atividade Estac]'	124
6.5 Modelo de Controle do Sistema	124
6.5.1 Controle da Seqüência de Operações dos Produtos	125
6.5.2 Controle do Fluxo de VATs	130
6.6 Controle Adicional do Fluxo de VATs	133
6.6.1 Um Modelo Conceitual para o Controle do Fluxo	
de Materiais	134
6.6.2 Definição do Estado de "Deadlock"	136
6.6.3 Detecção do Estado de "Deadlock"	137
6.6.4 Detecção do Estado Anterior ao "Deadlock"	139
6.6.5 Solução do "Deadlock"	141

6.6.6 Especificação do Controle em E-MFG	141
7 OBSERVAÇÕES FINAIS	148
REFERÊNCIAS	151

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de extensão ao MFG no sentido de aperfeiçoar seu poder de modelagem de Sistemas Integrados de Manufatura. Neste contexto, propõe-se o MFG Estendido como ferramenta de modelagem baseada em marcas individuais e regras adicionais para o controle do disparo das transições, obtendo-se assim uma ferramenta de nível mais alto mas que resguarda as propriedades das redes condição-evento para a realização do controle.

No sentido de orientar, de forma sistemática, a utilização desta ferramenta no processo de modelagem de sistemas complexos de elevado grau de flexibilidade, é proposta a metodologia E-MFG/PFS que se baseia na estruturação e hierarquização do processo de modelagem em vários níveis de abstração (inclusive os atributos das marcas), resultando em uma extensão à metodologia MFG/PFS.

Para mostrar o poder de modelagem desta ferramenta, aplica-se a metodologia E-MFG/PFS para a modelagem e controle de um sistema de manufatura composto por várias estações de trabalho, com elevada flexibilidade operacional, integradas por um sistema de transporte baseado em VATs. Para controlar o fluxo de VATs de forma eficiente, aplica-se uma técnica de controle que evita que o sistema entre em estado de "deadlock" em virtude de problemas de gerenciamento do fluxo de materiais característico do sistema.

ABSTRACT

This work proposes a Extended MFG to improve its modelling power of Integrated Manufacturing Systems. The Extended MFG is a modelling technique based on individual marks (tokens) and additional rules to control the transition firing. The aim is a enhanced tool that mantain the condition-event net properties to realize the system control.

In this context, the utilization of this tool for modelling process of complex systems with great level of flexibility is proposed by this E-MFG/PFS methodology, based on the structuration and hierarquization of the process modelling according to several abstraction levels (including the marks'attributes), arising in an extended MFG/PFS methodology.

To illustrate the powerfull of this modelling tool, the E-MFG/PFS methodology is applied to realize the modelling and control process of the manufacturing system composed by several work-stations, with great operational flexibility, integrated by an AGV transport system. To control the AGVs flow in an efficient way, is applied a theretical approach for avoiding the deadlock caused by management problems with the materials flow of the system.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE MANUFATURA

O desenvolvimento tecnológico no projeto de máquinas-ferramenta, robôs industriais e de sistemas formados pela integração destes dispositivos, vem causando profundas alterações quanto à forma de intervenção direta do elemento humano, através de operadores, nos processos de manufatura atuais. A seguir, apresenta-se uma breve evolução histórica dos sistemas de manufatura, estabelecendo as principais alterações de comportamento do homem neste ambiente. [ANNBORN (1984), DAVIES (1988), ITO (1988)].

Inicialmente, com o desenvolvimento de motores elétricos e pneumáticos mais compactos, houve uma efetiva redução dos operadores atuando como *fonte de força*.

O primeiro impacto causado pelo desenvolvimento de máquinas-ferramenta automáticas atingiu diretamente os operadores de usinagem. Estas máquinas necessitavam de um operador apenas para executar as tarefas relacionadas ao "setup" inicial, carga e descarga dos "pallets" e funções de

monitoração para o controle de informações relativas às dimensões da peça, ferramenta e problemas de funcionamento da máquina.

O próximo passo significativo que afetou a interface homem-máquina, foi o desenvolvimento do controle de máquinas por sofisticados servomecanismos, estabelecendo um maior grau de autonomia a estas unidades de produção. Estes dispositivos exigiam, por parte do operador, a manipulação de uma quantidade de informações muito maior para a especificação e manutenção do controle destas máquinas: necessitava-se de modelos físicos para a manutenção de dados analógicos.

Nesta etapa do processo evolutivo dos sistemas de manufatura, aguardava-se uma maneira de gerar dados numéricos de forma apropriada para a realização do controle dos dispositivos pertinentes ao ambiente de manufatura. Neste contexto, o desenvolvimento de computadores eletrônicos digitais proporcionaram uma alternativa consistente para a solução do problema de tratamento de dados numéricos.

O rápido desenvolvimento da capacidade de processamento dos computadores digitais, acompanhado de uma redução de custos, permitiram o desenvolvimento de máquinas-ferramenta de controle numérico (máquinas NC), controladas por pequenos microcomputadores de propósito geral, capazes de controlar todos os aspectos relacionados à:

- operação da máquina,
- troca de ferramenta e,
- troca de peças a serem usinadas.

O advento do controle numérico das máquinas marcou uma alteração fundamental na função do operador em relação à sua participação nos processos de usinagem. Suas atividades evoluíram de um simples operador de máquinas para

supervisor de produção de máquinas avançadas e centros de usinagem, realizando operações básicas relacionadas à monitoração global dos processos.

O próximo passo foi o desenvolvimento de sistemas de manufatura formados a partir da integração de máquinas-ferramenta e centros de usinagem, controlados por um computador central. Para a realização do fluxo de peças e ferramentas no sistema havia sistemas de transporte e manipulação de materiais baseados em veículos autônomos de transporte (VAT), rônos e esteiras.

Atualmente, a abordagem de sistemas de manufatura totalmente automatizados está sofrendo uma reestruturação para adaptar-se ao conceito de sistemas antropocêntricos inteligentes, de forma a considerar a intermediação entre a automação flexível e o elemento humano.

Os processos de manufatura, de uma forma genérica, podem ser interpretados em função de duas naturezas de atividades:

- Atividades mecanizadas repetitivas.
- Atividades decisórias baseadas no conhecimento humano.

As atividades mecanizadas repetitivas podem ser automatizadas de forma eficiente, a partir dos recursos técnicos disponíveis. Por sua vez, para realizar-se de forma eficiente as atividades baseadas no conhecimento humano necessitam-se de operadores ou sistemas capazes de representar suas habilidades. Este fato caracteriza o forte vínculo entre o elemento humano e um sistema de manufatura, uma vez que são sistemas abertos que se comportam dinamicamente de acordo com regras estabelecidas pelo próprio homem.

Baseado nestes fatos, existe uma variedade de atividades estritamente vinculadas ao conhecimento humano:

- Atividades de supervisão do sistema;
- Atividades de diagnóstico e reparo de falhas no sistema;
- Atividades de carga e descarga dos "pallets";
- Atividades de monitoração do sistema;
- Atividades de preparação ("setup") das máquinas e ferramentas.

Para a realização destas atividades é fundamental a existência de uma ferramenta de modelagem adequada para a representação consistente do comportamento dinâmico do sistema e que, simultaneamente, gere um modelo interpretado que represente claramente a estrutura e os processos a serem realizados, de forma a estabelecer uma interface confortável entre o sistema físico e o usuário da ferramenta. Desta forma, necessita-se de uma técnica de modelagem que possa ser útil para a representação das características de um sistema de manufatura capaz de contribuir para o planejamento e realização das atividades em questão.

1.2 A APLICAÇÃO DE REDES DE PETRI

Descrever o comportamento dinâmico de um sistema consiste em elaborar um modelo para o mesmo. Dependendo dos objetivos almejados, constroem-se modelos adequados, de diferentes tipos. Desta forma, um modelo que descreve os elementos de um sistema e suas interconexões denomina-se modelo estrutural. Por sua vez, um modelo que descreve o funcionamento de um sistema denomina-se modelo funcional.

No caso de um sistema de manufatura é possível dizer que possui como característica principal o fato de seu comportamento dinâmico ser definido pela transição de estados resultante da ocorrência de eventos discretos. O problema de controle destes sistemas está na supervisão dos estados que determinam as operações e tarefas a serem executadas. Além disso, uma vez que são compostos por uma variedade de máquinas e dispositivos, é essencial que o controle do sistema assegure também a cooperação entre seus elementos para a realização das operações previstas.

Para a identificação e solução dos problemas citados, as Redes de Petri constituem uma técnica de modelagem ideal devido a sua capacidade de representação formal e concisão [PETERSON (1981), REISIG (1985), REISIG (1992)]. Considerando-se as características dos sistemas de manufatura, a capacidade de representação das Redes de Petri engloba os seguintes aspectos:

- Representação estrutural do comportamento do sistema;
- Representação da estrutura hierárquica do sistema e;
- Representação do sistema baseado regras de produção.

A representação do comportamento dinâmico global do sistema, caracterizado pela transição de estados resultante da ocorrência de eventos, é difícil de ser analisada a partir de ferramentas tradicionais baseadas em autômatos finitos do tipo diagramas de fluxo e grafos reduzidos. Neste contexto, as Redes de Petri são capazes de representar de forma distribuída (localmente) o comportamento do sistema, permitindo a representação de paralelismos, seqüenciamentos e concorrências de eventos. Se os elementos da rede são utilizados inclusive para representar os elementos estruturais que compõem o sistema produtivo, é possível especificar seu controle obtendo-se assim, um modelo que descreve o funcionamento em conjunto com os elementos estruturais. Neste sentido, descreve-se o sistema a partir de um modelo estrutural-funcional.

Os produtos, ferramentas, máquinas, estações de trabalho, linhas de produção, células de manufatura são organizados e integrados de forma que os elementos de nível inferior ficam agrupados hierarquicamente segundo uma estrutura em árvore, de acordo com a capacidade funcional destes elementos. A utilização de Redes de Petri permite a representação desta estrutura de forma apropriada, através de lugares e transições, isto é, estes elementos podem representar sub-redes a serem refinadas em níveis inferiores.

Genericamente, pode-se dizer que um sistema de manufatura resulta da combinação de técnicas e métodos desenvolvidos por especialistas, de forma essencialmente experimental, para a realização de uma variedade de processos produtivos. Desta forma, o planejamento e controle destes sistemas baseiam-se também na representação, utilização e aquisição de conhecimento. As Redes de Petri possuem intrinsecamente uma estrutura na forma de regras do tipo se...então, sendo apropriadas para a representação de predicados, adequados para a descrição de conhecimento.

No sentido de perpetuar o desenvolvimento da aplicação das Redes de Petri no ambiente de manufatura, alguns aspectos devem ser investigados:

- A necessidade de adicionar elementos à rede, visando a modularização e funcionalidade para aplicações no controle de sistemas físicos, considerando também a descrição das relações de interface com o meio externo;
- A realização de simuladores de eventos discretos baseados em descrições a partir de Redes de Petri e;
- A capacidade de descrição de algoritmos de controle, envolvendo aspectos relacionados tanto ao controle seqüencial como ao controle de processos.

1.3 MOTIVAÇÕES DO TRABALHO

A adequação de Redes de Petri para a modelagem de sistemas de manufatura constitui-se em forte motivação para a utilização desta técnica como base para a especificação de ferramentas eficientes para a descrição de sistemas produtivos. Neste sentido foi proposta a metodologia MFG/PFS (Mark Flow Graph/Production Flow Schema) para a modelagem, análise e controle de sistemas de manufatura [MIYAGI (1988)].

As investigações realizadas no sentido de aplicar-se esta ferramenta a sistemas de manufaturas cada vez mais complexos, com maior grau de flexibilidade, que exigem a representação de estratégias de controle mais elaboradas, evidenciam uma limitação desta ferramenta: se as regras de controle são muito complexas, esta complexidade dificulta a construção do modelo MFG correspondente, abdicando-se da facilidade de interpretação do sistema a partir do modelo.

Este impasse revelou-se em forte motivação para se propor extensões ao MFG que fortaleçam e simplifiquem o poder de representação de estratégias de controle.

Neste trabalho, a proposta é elevar o poder de representação do MFG inserindo-se atributos às marcas, a exemplo do que ocorre em Redes de Petri Colorida [VISHWANADHAM; NARAHARI (1987)], e associando-se regras adicionais de lógica proposicional às transições. Neste contexto é proposta uma extensão do MFG denominada MFG Estendido.

Para auxiliar a descrição de sistemas produtivos de grande porte que envolvem um elevado número de atributos agregados às marcas, é proposta também uma abordagem de estruturação hierárquica dos atributos das marcas individuais, de forma a gerar uma interpretação para a estrutura do vetor de

atributos que acompanha as marcas. Neste contexto, a partir da hipótese de que o sistema de manufatura é caracterizado pelos fluxos de itens presente, aplica-se uma abordagem hierárquica para a sua modelagem. Para isto utiliza-se o PFS para realizar a estruturação e hierarquização do processo de modelagem em vários níveis de abstração (inclusive os atributos das marcas) resultando em uma metodologia que está sendo proposta como uma extensão à metodologia MFG/PFS.

Como aplicação da metodologia proposta, realiza-se a especificação do controle supervisorio de sistemas produtivos, mostrando-se a capacidade da ferramenta em descrever os níveis de flexibilidade presentes em sistemas desta natureza. Para o caso de sistemas flexíveis, cuja flexibilidade funcional assemelha-se a sistemas do tipo "job-shop", aplica-se uma técnica de controle adaptativo para sistemas dirigidos por eventos baseada na alteração das estratégias de controle, de acordo com o estado atual do sistema.

O Capítulo 2 apresenta um breve estudo a respeito de sistemas dinâmicos de variáveis contínuas e sistemas dinâmicos dirigidos por eventos. Posteriormente, introduz-se o conceito de Sistemas Integrados de Manufatura, apresentando aspectos relacionados a sua organização estrutural e hierarquia funcional.

O Capítulo 3 apresenta os princípios e características do MFG, seus elementos estruturais, suas inter-relações e o comportamento dinâmico da marcação. Em seguida são tratados aspectos relacionados à concorrência e conflito de atividades, o seqüenciamento e simultaneidade de eventos e os conceitos de "Safeness", "Deadlock" e "Liveness" aplicados ao MFG.

No sentido de representar a evolução da capacidade e eficiência de modelagem do MFG, apresenta-se o MFG Funcional como resultado de um processo de modularização do mesmo, detalhando-se os aspectos relativos aos "boxes" funcionais.

Finalizando este capítulo apresenta-se a metodologia MFG/PFS, estendendo a aplicação do MFG para a modelagem estruturada e interpretada de sistemas de manufatura de grande porte.

No Capítulo 4 apresenta-se, inicialmente, uma explanação a respeito da limitação do poder de modelagem do MFG Funcional, relevando-se aspectos relacionados à capacidade de representação dos níveis de flexibilidade de um sistema. A seguir, descreve-se os elementos estruturais básicos do E-MFG e o comportamento dinâmico da marcação destes grafos, detalhando-se aspectos relacionados à manipulação das marcas e regras de disparo das transições. Por fim, aplica-se o E-MFG na descrição de um exemplo de sistema produtivo para destacar a flexibilidade e as limitações desta nova ferramenta. Neste sentido, o capítulo é concluído realizando-se uma comparação das características fundamentais do MFG Funcional (F-MFG) e do E-MFG.

No Capítulo 5 apresenta-se uma metodologia para especificação do controle supervisorio de um SIM. Neste sentido, detalha-se aspectos relacionados à especificação do controle nos vários níveis de hierarquia funcional do sistema, considerando-se também a flexibilidade presente em cada um destes níveis. Neste sentido é proposta a metodologia E-MFG/PFS para a modelagem e especificação do controle.

No capítulo 6, apresenta-se uma aplicação da metodologia E-MFG/PFS, para o caso em que o grau de flexibilidade presente no sistema aproxima-o de um "job-shop". Baseado no trabalho desenvolvido por YOSHIDA (1988), propõe-se uma técnica de controle que garante que sejam evitadas situações inesperadas de "deadlock" por alocação indevida dos recursos disponíveis no sistema de transporte que integra o sistema de manufatura.

No Capítulo 7 apresenta-se as observações finais relativas a propostas no sentido de implementar-se sistemas de controle baseados em E-MFG e uma variedade de sugestões para realização de trabalhos futuros relacionados à aplicação desta ferramenta de modelagem.

Capítulo 2

FLEXIBILIDADE E O AMBIENTE DE MANUFATURA

2.1 INTRODUÇÃO

O contínuo avanço da microeletrônica e informática constituem-se nos principais fatos que permitem o desenvolvimento de sistemas dotados de uma peculiaridade: apresentam um comportamento dinâmico baseado em regras estabelecidas pelo próprio homem [HO (1989)]. Exemplos de sistemas dessa natureza são redes de comunicação, sistemas de tráfego, sistemas computacionais, sistemas de manufatura.

Uma vez que são concebidos pelo homem - especialmente no que se refere ao modo de operacionalidade - não há leis invariantes da Física que contribuam efetivamente para a modelagem desses sistemas. Esse aspecto é fundamental para se compreender o grau de dificuldade em associar-se uma técnica de modelagem e controle eficientes a partir dos conhecimentos adquiridos e exaustivamente aplicados a sistemas dinâmicos convencionais (apropriadamente classificados como "Sistemas de Variáveis Contínuas" - SVCs) em que o comportamento dinâmico pode ser avaliado a partir de um equacionamento matemático adequado,

baseado na teoria de cálculo integral e diferencial [OGATA (1982), VOLAND (1986)].

No sentido de caracterizar o ambiente de manufatura automatizada, neste capítulo é apresentado inicialmente um breve estudo a respeito de SVCs e SEDs, destacando-se as diferentes naturezas de comportamento dinâmicos dessas classes de sistemas. Posteriormente, introduz-se o conceito de Sistemas Integrados de Manufatura apresentando, em seguida, aspectos relacionados a sua organização estrutural e hierarquia funcional. Finalizando o capítulo, realiza-se uma descrição do comportamento dinâmico dos sistemas de manufatura a partir da correlação entre SIMs, SEDs e Sistemas Condição-Evento e apresenta-se uma abordagem baseada em Sistemas Antropocêntricos.

2.2 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS SVCs

As teorias de controle voltadas para o estudo de sistemas dinâmicos de variáveis contínuas (SVCs) fundamentam-se em modelos matemáticos do sistema (planta) descritos por equações diferenciais, dispondo-se atualmente de um consistente suporte teórico para a descrição, análise e controle do SVC que se deseja investigar.

Como exemplo, considere a aplicação da teoria de controle moderno para a análise de um SVC por espaço de estados. O modelo do sistema baseia-se em um vetor de estados correspondente ao conjunto de n variáveis de estado necessário para representar seu comportamento dinâmico. Este vetor descreve uma trajetória em \mathbb{R}^n , sendo capaz de representar o comportamento do sistema em um instante qualquer, a partir de um instante inicial em que é excitado por uma função de entrada. Esta determinação do comportamento do sistema a partir do conhecimento das variáveis de estado explicita a interpretação matemática a respeito da conceituação de estado do sistema [HO (1989), CASSANDRAS;

RAMADGE (1990)]. A figura 2.1 ilustra a evolução de uma variável de estado em função do tempo para um exemplo de SVC.

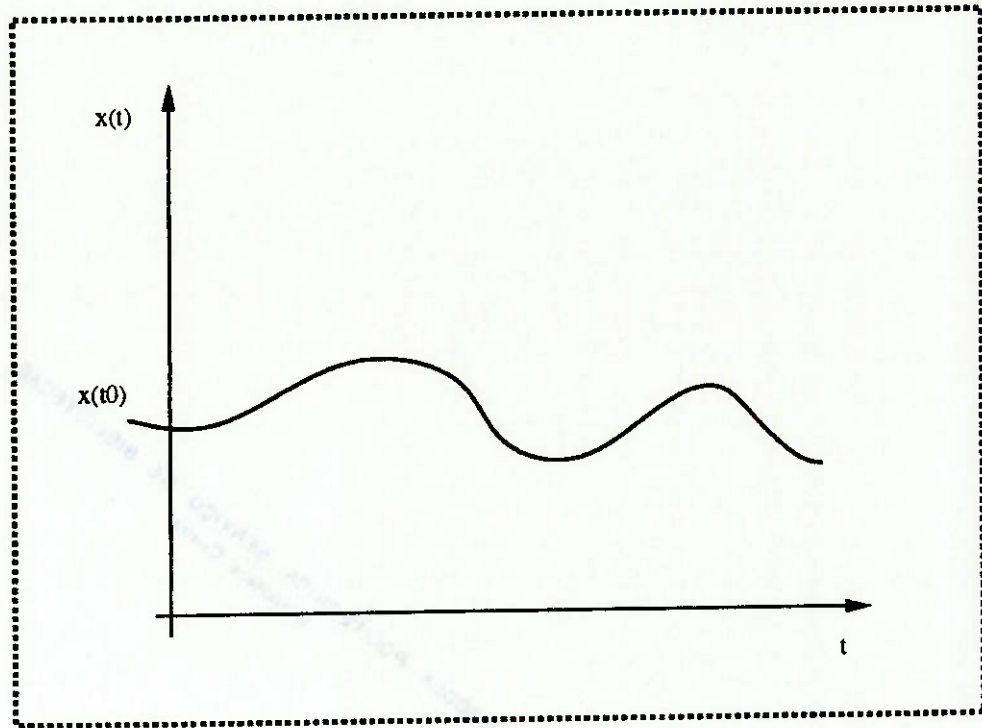


Fig. 2.1 Evolução de uma variável de estado de um SVC em função do tempo.

2.3 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS SEDs

Os SEDs apresentam um comportamento dinâmico de natureza diferenciada se comparado aos SVCs: a evolução dinâmica do sistema está subordinada a ocorrência de eventos¹. Neste contexto, a análise da evolução do comportamento de um SED investigado a partir de um conjunto de variáveis de estado (a exemplo do que foi realizado nos SVCs) revela fatos importantes.

Em primeiro lugar, a definição matemática de estado utilizada para SVCs não possui a mesma interpretação. No caso dos SEDs, o conceito de estado restringe-se à interpretação física do sistema. Partindo-se do pressuposto de que o

¹Formalmente, podemos definir evento como uma ação que provoca uma transição de estado em tempo finito.

formalismo de uma representação matemática contém uma interpretação física, houve uma perda de informação relacionada a ausência de um grau de formalismo matemático adequado capaz de representar efetivamente o comportamento dinâmico do sistema. Em CAO; HO (1990) discute-se as técnicas de modelagem de SEDs destacando-se o problema da ausência de modelos que apresentem o mesmo grau de concisão matemática e realização computacional apresentados pelas equações diferenciais para variáveis contínuas nos SVCs.

O segundo fato importante a ser destacado, refere-se ao comportamento dinâmico desses sistemas (SEDs). Baseado no conceito de estado apresentado para SEDs, a evolução do estado global do sistema (correspondente ao vetor de estado nos SVCs) ocorre de forma descontínua, representando a natureza discreta dos estados² [STONE (1973)]. A figura 2.2 ilustra a evolução do comportamento de um SED a partir de eventos que ocorrem no tempo³.

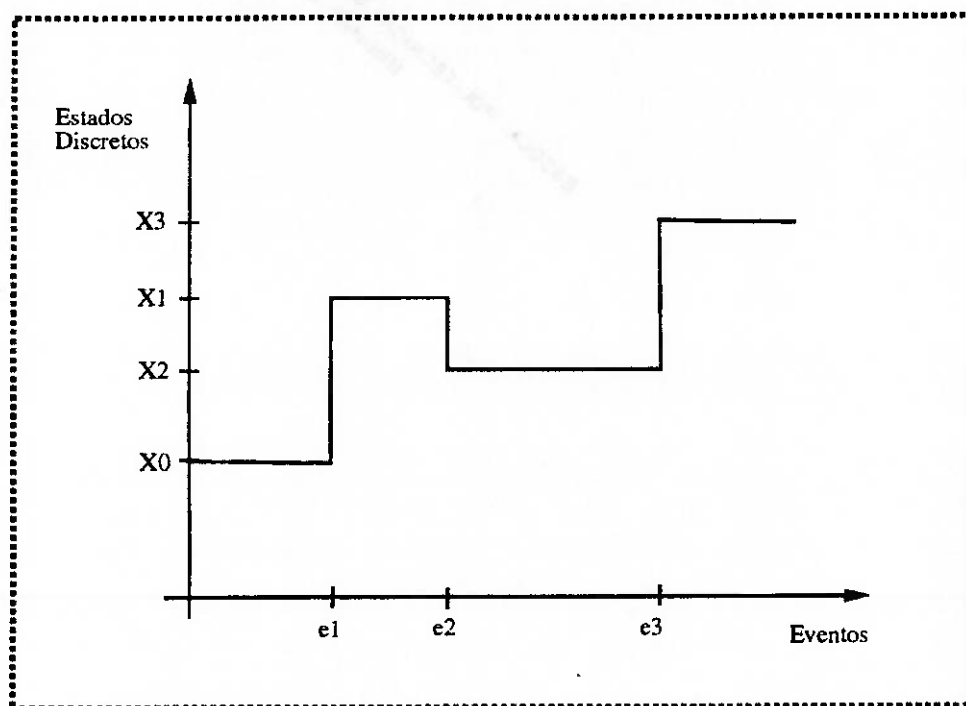


Fig. 2.2 Evolução do comportamento de um SED a partir da ocorrência de eventos

²A natureza discreta dos estados não deve ser confundida com sistemas de tempo discreto que se baseiam na amostragem de sinais contínuos no tempo (discretização).

³Na figura 2.2 não foi representado o tempo de duração de cada evento. Considerou-se eventos instantâneos.

O terceiro aspecto a ser considerado refere-se ao conceito de variável independente assumido pelo tempo. No caso em que se realize uma análise de um SVC no domínio do tempo, este é uma variável independente analisando-se a evolução do sistema em função dessa variável. Entretanto, os SEDS evoluem no tempo governados por uma seqüência de eventos e não há necessariamente uma pré-determinação do instante em que cada evento deverá acontecer. A maioria dos casos que envolve sistemas complexos incorporam este aspecto de não determinismo sendo possível apenas obter condições suficientes para estabelecer-se certas seqüências para a ocorrência dos eventos. De acordo com esta abordagem, o conceito de variável independente que o tempo assume nos SVCs aplica-se à seqüência de eventos nos SEDs.

Ainda com relação à seqüência de eventos há mais um fato a ser destacado: refere-se a forma de especificação dessa seqüência na modelagem de SEDs. Segundo CASSANDRAS; RAMADGE (1990) há duas tendências: modelos temporizados em que se associa a cada evento o instante de sua ocorrência $\{(e_1, t_1), (e_2, t_2), (e_3, t_3), \dots\}$ e modelos não temporizados que se baseiam em simples ordenação dos eventos $\{e_1, e_2, e_3, \dots\}$. Por exemplo, em um modelo de um SED obtido para realizar uma simulação, visando medir desempenho, o fator tempo é, com certeza, fundamental para descrever o modelo do comportamento do sistema. Por sua vez, se o objetivo for realizar o controle de um SED é possível necessitar-se de ferramentas de modelagem capazes de representar as condições para a evolução do sistema que passa a depender da ocorrência de eventos. A partir dessas observações apresentadas evidencia-se o fato de que as tendências estão associadas ao objetivo que se deseja realizar e constituem-se na causa fundamental de haver uma diversidade de abordagens envolvendo a modelagem de SEDs.

Portanto, a não existência de uma teoria unificada para SEDs e SVCs, implica na adaptação dos conceitos de outras disciplinas para esta nova classe de sistemas. Esta postura resulta em uma variedade de modelos que o projetista deve

selecionar de acordo com seus objetivos. Basicamente existem modelos de SEDs fundamentados em cadeias de Markov, Redes de Filas, modelos algébricos, autômatos finitos e Redes de Petri. Em MIYAGI et al. (1989) e CAO; HO (1990) é realizada uma comparação destes vários modelos destacando-se a aplicabilidade de cada um deles. A Tabela 2.1 representa uma classificação básica das várias técnicas utilizadas para a modelagem de SEDs [HO (1989)].



2.4 MANUFATURA FLEXÍVEL

Os sistemas de manufatura flexíveis têm sido considerados exemplos singulares de sistemas produtivos, capazes de corresponder às expectativas da sociedade em relação às necessidades atuais e futuras. Na realidade, atualmente, percebe-se a evolução destes sistemas em dois sentidos:

- primeiramente, no sentido de estabelecer o amadurecimento dos sistemas presentes;
- em outro sentido, procura materializar prováveis concepções de sistemas para o futuro.

Em ambos sentidos, há uma necessidade premente por metodologias consistentes para auxiliar durante todo o ciclo de vida de um sistema de manufatura [LEUNG; SURI (1990)]. Neste sentido, como contribuição para especificar as necessidades de uma ferramenta adequada para a descrição de um sistema produtivo dessa natureza, realiza-se uma conceituação do ambiente de manufatura automatizada, caracterizando-se o seu comportamento dinâmico a partir de avaliações quanto à estrutura e operacionalidade de sistemas pertinentes a este ambiente.

Tabela 2.1 Classificação dos modelos de SEDs

	Temporizado	Não temporizado
Lógico	Lógica temporal MFG	Máquinas de estado finitas Redes de Petri MFG
Álgebraico	Álgebra Min-Max	Processos Seqüenciais
Análise de Performance	<div style="background-color: #cccccc; padding: 5px;"> Cadeias de Markov Redes de Filas Redes de Petri Estocásticas </div>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Estocástico </div> <div style="text-align: center;">  Determinístico </div> </div>		

2.4.1 CONCEITUAÇÃO

Uma das formas de caracterizar-se manufatura flexível baseia-se na avaliação da correlação existente entre os três elementos fundamentais pertinentes a este ambiente de produção: os conceitos de manufatura, automação e flexibilidade.

Primeiramente, o conceito de processo de manufatura em um sistema de manufatura discreta baseia-se na realização de transformação da materia prima em produtos acabados, de acordo com especificações técnicas (desde geométricas até controle de qualidade) pré-estabelecidas [KÜNZLE (1990)]. Já o conceito de automação refere-se à tecnologia relacionada à aplicação de sistemas mecânicos, eletrônicos e computadorizados para o controle automático da operação da produção [ASFAHL (1985)].

Quanto à flexibilidade, há uma estreita relação entre este conceito e a forma de realizar-se a automação de um sistema [GROOVER (1987)]. A partir dessa premissa, um sistema de produção automatizado pode ser classificado em três tipos básicos: automação fixa, automação programável e automação flexível.

Em um sistema de automação fixa a seqüência de operações é limitada pela configuração dos equipamentos. Envolve altas taxas de produção e baixa flexibilidade quanto a adaptação à alterações do produto. Nos sistemas de automação programável, os equipamentos que os constituem são programáveis, permitindo a reprogramação de novos processos.

No caso de um sistema de automação flexível há a capacidade de produzir-se uma variedade de produtos sem que haja perda de tempo em adaptar-se o sistema às alterações de um produto em relação ao próximo a ser processado. A diferença fundamental em relação à automação programável está em não envolver perdas de tempo com reprogramação e "setup" das máquinas.

Relacionando-se os conceitos de manufatura, automação e flexibilidade apresentados, emerge o termo manufatura automatizada, a partir de uma fusão desses elementos, englobando uma grande variedade de sistemas produtivos. Entretanto, quando o objetivo é atender de forma eficiente fatores fundamentais como o incremento da produtividade, associado à diminuição do ciclo de vida dos produtos e desenvolvimento de novos processos, o conjunto de sistemas produtivos restringe-se aos sistemas de manufatura automatizada flexíveis. O desenvolvimento desses sistemas reflete na ocorrência de problemas provenientes da existência de um alto grau de integração dos elementos, envolvendo técnicas de controle hierárquico complexas e sistemas de transporte de elevada capacidade operacional para a realização de diversos roteamentos.

2.4.2 FLEXIBILIDADE E A ORGANIZAÇÃO DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

Flexibilidade é uma característica essencial dos sistemas produtivos atuais. Ambientes de manufatura automatizada correlacionam-se fortemente com a necessidade de desenvolver-se sistemas produtivos fundamentados nos critérios de eficiência e flexibilidade. Baseado nestes requisitos, o objetivo é capacitar um sistema a adaptar-se às mudanças do ambiente fabril, conjugado a uma eficiente automação das operações [GROSSESCHALLAU (1986)].

Para que um sistema de manufatura automatizada flexível possa atender aos requisitos acima, diversos tipos de flexibilidade devem ser considerados. Basicamente, define-se as seguintes naturezas de flexibilidade [KUSIAK (1986), BARAD (1988)]:

- a) Flexibilidade a nível de máquina-ferramenta, avaliada a partir da variedade de peças que podem ser processadas pela respectiva máquina.
- b) Flexibilidade do sistema de transporte de materiais, relacionada à habilidade de manipular-se uma variedade de peças, segundo rotas diferentes.

c) Flexibilidade do sistema computacional, medida a partir do grau de adaptabilidade às alterações de suas funções.

d) Flexibilidade funcional, relacionada a vários aspectos fundamentais como capacidade de processamento de um "mix" de produtos e possibilidade de vários roteamentos para a realização de um mesmo processo.

Para um sistema produtivo de maior complexidade pode-se dizer que sua flexibilidade é função dos vários níveis de flexibilidade apresentados acima.

Segundo MASIP (1988) apud KÜNZLE (1990) "Deve-se projetar um sistema produtivo tão rígido quanto seja possível e tão flexível quanto seja necessário". Uma reflexão a respeito dessa citação evidencia a adequação em se adotar os critérios de volume de produção e variedade de produtos, respectivamente, como base para definir-se a organização de um sistema de manufatura. Uma classificação comumente conhecida baseia-se em três naturezas de sistema: "flow-shop", "job-shop" e as células de manufatura [BEL et al. (1988)].

Um sistema produtivo do tipo "flow-shop" assemelha-se a uma linha de produção com relativa flexibilidade. O grau de flexibilidade inerente a essas organizações de sistemas define-se a partir da configuração das máquinas-ferramenta que compõem a linha. Alternadamente, os sistemas do tipo "job-shop" apresentam uma enorme flexibilidade, podendo englobar todos os níveis citados anteriormente, mas, em virtude da grande complexidade de gerenciamento dos fluxos de materiais e informações, apresentam um índice de produtividade muito menor quando comparado a uma linha de produção do tipo "flow-shop".

Em uma situação intermediária encontra-se a organização baseada em células de manufatura. A aplicação da Tecnologia de Grupo (TG) permite a organização das máquinas em células de produção, delimitadas fisicamente ou virtualmente (conforme seja mais adequado), e permite também o agrupamento das peças em famílias de peças, segundo suas características de projeto [KUSIAK;

CHOW (1988)]. As células representam uma solução no sentido de obter-se um sistema com bom índice de produtividade associado a um maior grau de flexibilidade, se comparado ao sistema "flow-shop".

Não há fronteiras concretamente definidas em relação à aplicabilidade de cada um destes tipos de organização, o que por sua vez contribui para o surgimento de novas arquiteturas a partir desses modelos básicos.

2.4.3 A ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS SISTEMAS INTEGRADOS DE MANUFATURA (SIM)

A organização estrutural de um sistema de manufatura automatizada flexível pode ser definida aplicando-se os conceitos básicos propostos por KUSIAK (1986). Define-se um módulo básico de produção que corresponde a uma estação de trabalho composta basicamente por uma máquina-ferramenta (MF) à qual pode ser integrado um magazine de entrada (Mag-in), um magazine de saída (Mag-out) e ainda elementos vinculados ao grau de automação e flexibilidade que se deseja para a estação (magazine de ferramentas, elementos para "palletização" e "depalletização", etc.). A figura 2.3 ilustra o modelo de uma estação de trabalho (ET).

A partir dessa unidade básica de produção, é possível compôr-se sistemas automatizados de manufatura de crescente complexidade. O próximo arranjo proposto, representado pela figura 2.4, corresponde a um sistema produtivo do tipo "flow-shop" que se denomina de linha de manufatura flexível (LMF). Neste caso as estações de trabalho são integradas por um sistema de transporte contínuo e automático, a exemplo do que ocorre nas linhas de produção.

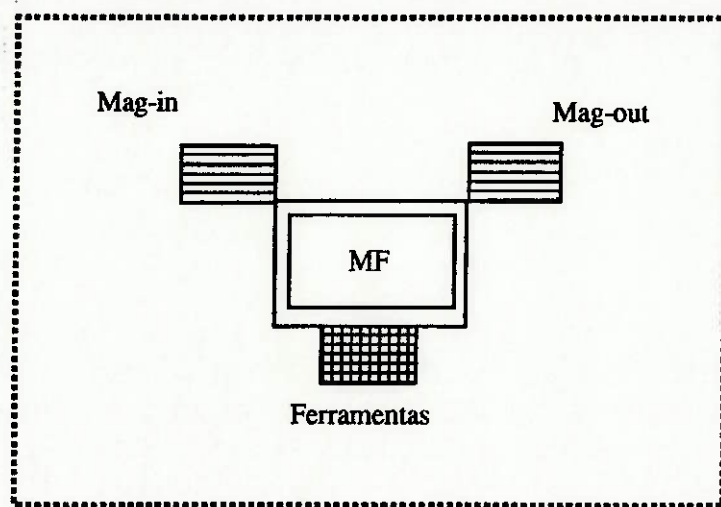


Fig. 2.3 Representação de uma estação de trabalho

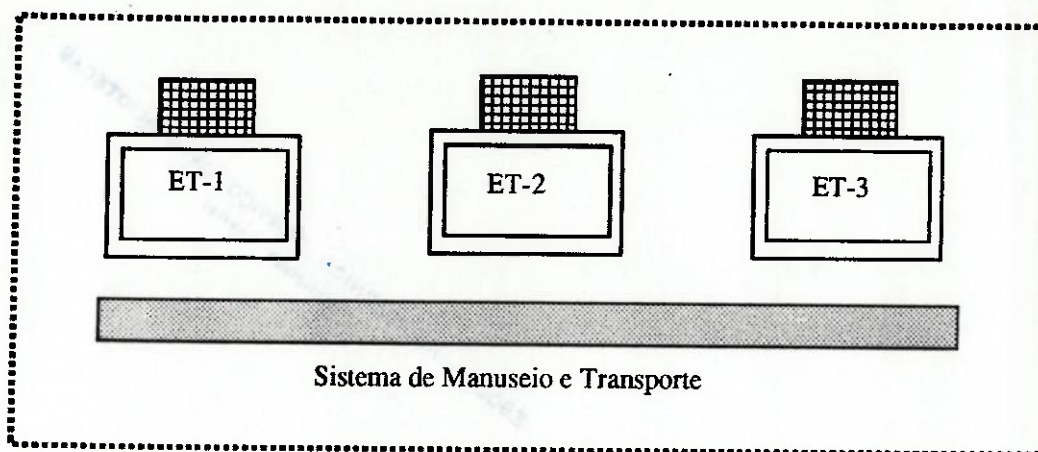


Fig. 2.4 Representação de uma linha flexível

Outra possibilidade de composição corresponde à figura 2.5 em que se representa uma célula de manufatura flexível (CMF)). Esse sistema pode ser composto por várias estações de trabalho, integradas por algum sistema de transporte e manipulação de materiais (robôs, veículos autônomos de transporte, etc) de forma a permitir a realização de vários processos de manufatura previamente estabelecidos a partir da aplicação de TG.

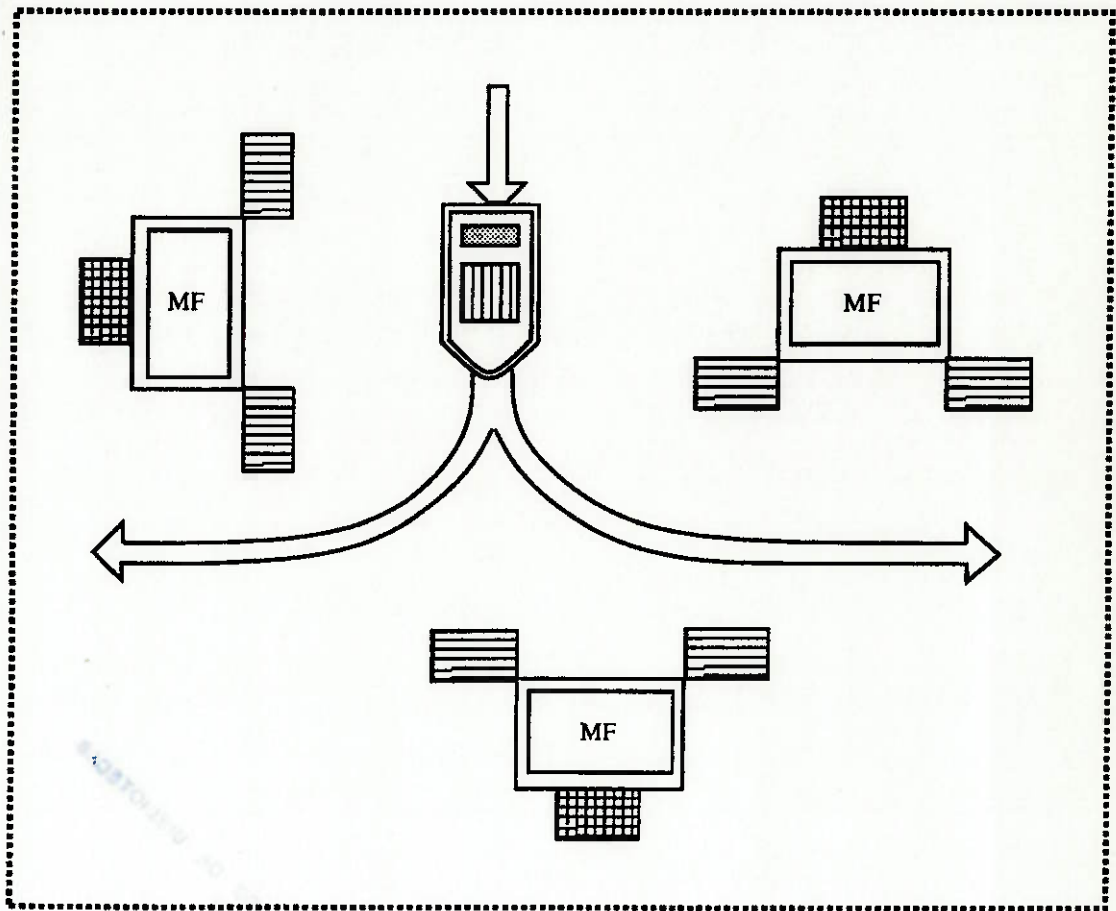


Fig. 2.5 Representação de uma célula de manufatura

Para atribuir-se uma interpretação ao modelo que representa a planta do sistema produtivo, considera-se os três arranjos mostrados pelas figuras 2.3 a 2.5 como modelos básicos de organização para a realização de processos de manufatura. Para obter-se sistemas de maior complexidade, realiza-se uma composição desses modelos e o sistema composto desta forma, representa um Sistema Integrado de Manufatura (ver figura 2.6), capaz de realizar uma variedade de processos de forma independente a partir de um controle adequado do fluxo de itens concatenado ao sistema.

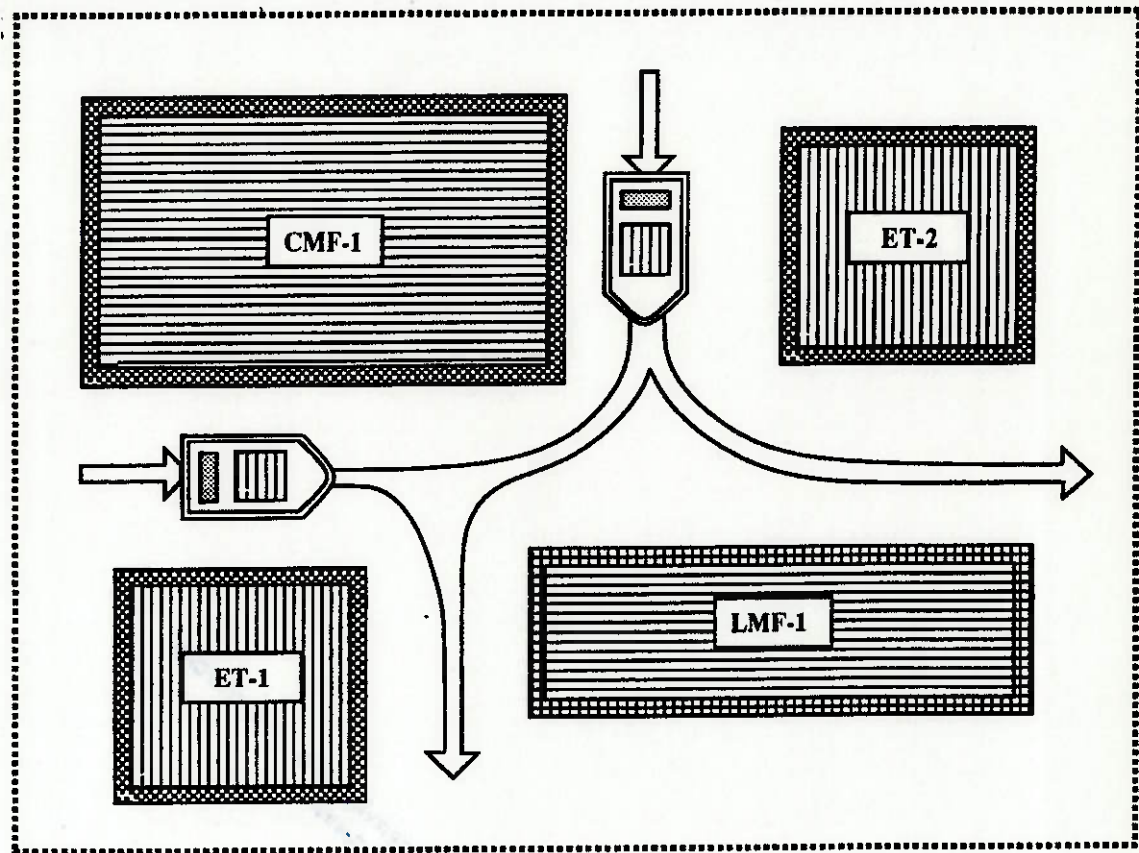


Fig. 2.6 Representação de um Sistema Integrado de Manufatura

2.4.4 COMPOSIÇÃO FUNCIONAL E HIERARQUIA

Na seção anterior apresentou-se uma forma de abordagem do problema de gerar uma interpretação à estrutura de um SIM. O objetivo é gerar elementos que permitam estabelecer uma relação entre o modelo de organização estrutural e o modelo funcional de um SIM. Funcionalmente, de acordo com KUSIAK (1986), pode-se dizer que um SIM é composto por três subsistemas fundamentais:

- um sistema de produção formado por um conjunto de máquinas e dispositivos controlados por computador, para realizar operações de usinagem, montagem, "palletização" e "depalletização";

- um sistema de transporte e manipulação para a realização do trânsito e armazenagem de peças, ferramentas, "palletes" e fixadores;
- um sistema de supervisão para coordenar o fluxo de materiais, escalonando os processos e operações, e a manutenção do controle do fluxo de informações para a tomada de decisões adequada à integração destes elementos.

Esta abordagem é fundamental como ponto de partida para se definir as necessidades que devem ser satisfeitas por uma forma de representação do modelo funcional que descreva a complexidade do comportamento dinâmico de um SIM.

Em relação às organizações estruturais propostas anteriormente, é necessário avaliar a variação do grau de operacionalidade que pode ocorrer nesses sistemas. No caso da complexidade do sistema de produção, pode-se evoluir desde uma simples estação de trabalho até um elaborado conjunto de células e linhas flexíveis integradas, para a realização de uma variedade de processos. Ao considerar-se o sistema de transporte, pode variar também desde um simples mecanismo baseado no acionamento de esteiras rolantes até complexos sistemas baseados no gerenciamento de veículos autônomos de transporte (VATs). Neste contexto, é evidente que a complexidade do sistema de supervisão para o controle desses sistemas varia substancialmente, de acordo com a capacidade funcional dos elementos a serem controlados [MIYAGI (1988)].

Para realizar de maneira eficiente a descrição funcional de um SIM é adequado uma abordagem hierárquica capaz de organizar a diversidade associada à capacidade operacional de seus elementos, em conjuntos homogêneos subordinados (no que se refere à capacidade funcional). Em MENENDEZ; KÜNZLE (1989) é proposta uma estrutura hierárquica em quatro níveis: Planta, Célula, Estação e Equipamento. Baseado nessa abordagem, a partir da composição estrutural de um SIM, pode-se atribuir quatro níveis hierárquicos fundamentais para uma descrição funcional consistente:

- Nível de chão de fábrica,
- Nível de estações de trabalho,
- Nível de células de manufatura e linhas flexíveis,
- Nível de SIM.

2.4.4.1 Nível de Chão de Fábrica

Corresponde ao conjunto de todos os dispositivos que estão vinculados de alguma forma à realização dos processos de manufatura incluindo as máquinas-ferramenta, os dispositivos de transporte e manipulação direta dos materiais e ferramentas e demais elementos que de alguma forma realizam ações pertinentes aos processos.

É o único nível em que há uma interação direta com os elementos físicos da fábrica, havendo uma caracterização do funcionamento dos dispositivos a nível de equipamento, preocupando-se com o acionamento dos atuadores em contato direto com os processos.

2.4.4.2 Nível de Estações de Trabalho

Neste nível as unidades de produção correspondem à estações de trabalho, havendo uma preocupação em estabelecer a coordenação das atividades pertinentes a estas unidades de produção. De acordo com a figura 2.1 uma estação de trabalho pode ser representada por uma máquina-ferramenta, magazines de entrada e saída para a armazenagem temporária de materiais e um conjunto de ferramentas próprio da máquina, que lhe garante flexibilidade quanto ao processo. Dependendo da complexidade da estrutura do SIM, há várias atividades que representam o funcionamento do sistema a esse nível.

Para um sistema produtivo organizado em várias estações de trabalho distribuídas funcionalmente, a exemplo do que ocorre em sistemas do tipo "job-shop", a descrição funcional no presente nível está relacionada à coordenação de atividades relacionadas à carga, processamento e descarga de materiais em cada uma das máquinas. Quanto a manutenção do fluxo de materiais, responsável pela integração de todo o conjunto, é necessário considerar as atividades relacionadas à coordenação de robôs para as ações de carga e descarga e de esteiras e/ou VATs para a realização do transporte.

No caso de organizações de maior complexidade estrutural, envolvendo células de manufatura e linhas flexíveis, a operacionalidade a nível de estações de trabalho envolve atividades relacionadas à coordenação das ações dos dispositivos de manipulação e transporte para armazenamento entre as estações de trabalho (nas células de manufatura) e manutenção do fluxo contínuo de materiais (nas linhas flexíveis) objetivando obedecer um certo escalonamento de atividades definido em um nível hierárquico superior que corresponde ao próximo nível a ser apresentado.

2.4.4.3 Nível de Células de Manufatura e Linhas Flexíveis

Neste nível os elementos básicos de produção passam a ser as células de manufatura e as linhas flexíveis. As atividades pertinentes a esse nível referem-se ao escalonamento de tarefas às células de manufatura e às linhas flexíveis, de acordo com um plano de produção pré-estabelecido.

Para a manutenção do fluxo de materiais entre as células (células e/ou linhas) realiza-se atividades de gerenciamento do sistema de transporte e manipulação de materiais de forma a garantir o balanceamento da produção à nível de célula.

2.4.4.4 Nível de SIM

Este nível compreende o estado global da fábrica e a unidade de produção é representada pelo próprio SIM. As atividades relacionam-se às decisões para lançamento de operações de acordo com o cronograma de produção. Outra natureza de atividade realizada nesse nível corresponde à detecção de falhas dos elementos físicos e incorporação de alterações vinculados aos produtos e inovações tecnológicas propostas.

2.4.5 COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM SIM

A dinâmica de um SIM está relacionada à natureza dos processos de manufatura associada à natureza dos elementos que compõem esse sistema. Em relação aos processos de manufatura há um conjunto de cinco características fundamentais comuns à diferentes processos [BRAND; KOPAINSKY (1988)]:

- Comportamento dinâmico estabelecido por condições e eventos,
- Equipados com sensores e atuadores,
- Causalidade,
- Comportamento determinístico,
- Repetibilidade de estados.

Em geral, os elementos físicos que constituem um SIM são de natureza discreta, isto é, cada elemento possui um número limitado de estados alcançáveis bem definidos. Pode-se dizer então que um sistema formado a partir da integração desses elementos é um sistema de estados discretos e que a evolução destes estados está vinculada a determinadas condições pré-estabelecidas e a ocorrência de eventos. Sistemas que apresentam esta natureza de comportamento dinâmico constituem uma classe de SEDs e são apropriadamente denominados Sistemas Condição-Evento [MIYAGI (1985)]. Como forma de exemplificar o conceito de condição-evento para os sistemas de manufatura, considere uma estação de

trabalho em que se realiza uma simples seqüência de operações <carga-processamento-descarga> dispondo de um robô (para a carga e descarga), uma máquina-ferramenta (para o processamento) e duas esteiras para a entrada e saída de materiais (figura 2.7).

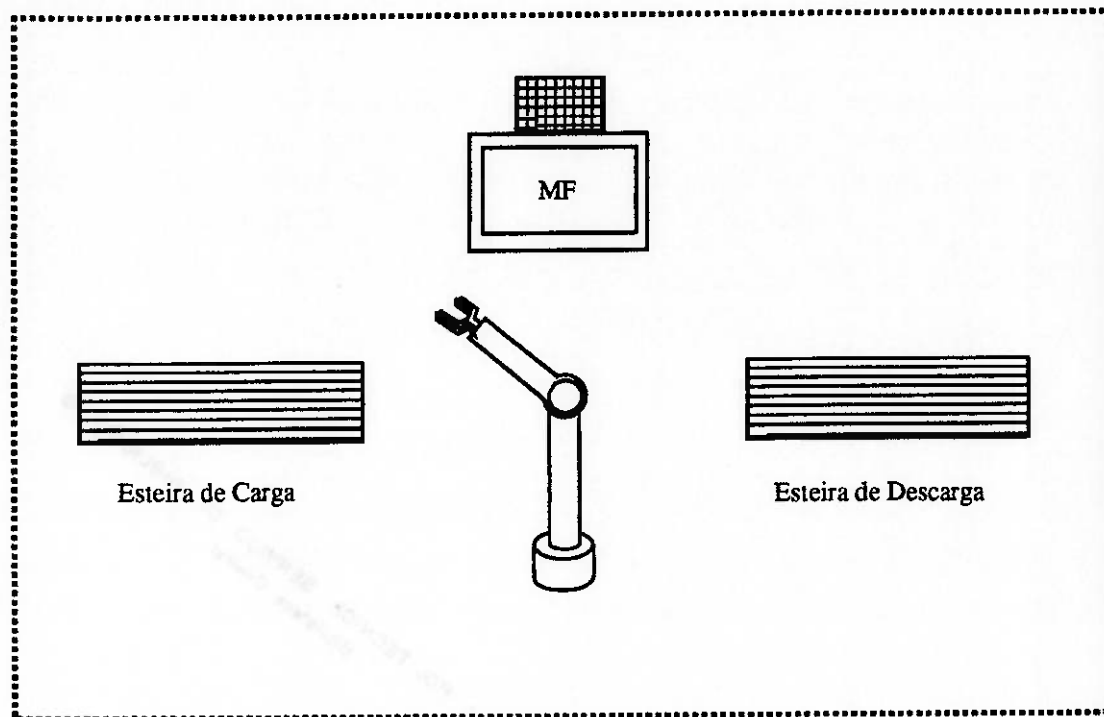


Fig. 2.7 Exemplo de estação de trabalho

A seqüência de operações <carga-processamento-descarga> pode ser representada por uma descrição do tipo condição-evento que pode ser interpretada da seguinte forma:

< condição > = Robô disponível & Máquina disponível

< evento > = Chegada de uma Peça

< condição > = Peça pronta para ser carregada

< evento > = Robô inicia processo de carga

< condição > = Robô carregando peça

< evento > = Robô finaliza carga

< condição > = Peça pronta para ser processada

< evento > = Máquina inicia processo

- < condição > = Máquina processando
- < evento > = Máquina finaliza processo
- < condição > = Peça pronta para ser descarregada
- < evento > = Robô inicia processo de descarga
- < condição > = Robô descarregando peça
- < evento > = Robô finaliza descarga

Uma vez que os SIMs são sistemas do tipo condição-evento representando uma classe de SEDs, há uma herança das propriedades destes presentes no ambiente de manufatura flexível. Baseado nisso, um SIM pode apresentar características do tipo assincronismo, paralelismo e conflito.

O assincronismo está relacionado à propriedade herdada dos SEDs segundo a qual a seqüência de eventos corresponde ao conceito de variável independente assumida anteriormente pelo tempo, isto é, os eventos só ocorrem se as condições forem satisfeitas. Quanto ao paralelismo, está associado a independência dos elementos que compõem um SIM: se houver dois ou mais processos representados por condições que podem ser mantidas simultaneamente, então, os eventos que não se correlacionam podem ocorrer de forma independente. No caso do conflito, corresponde a uma situação em que uma condição é pré-condição para a ocorrência de vários eventos e dependendo de qual evento ocorrer, diferentes condições são estabelecidas.

Além das características apresentados é importante discutir os aspectos referentes à causalidade, repetibilidade de estados e comportamento determinístico.

Causalidade significa que antes e depois de uma condição há sempre eventos relacionados, e cada evento é definido por pré-condições e pós-condições de tal forma que o estado atual do sistema é resultado somente de condições e eventos anteriores. Em todos os casos práticos, o número de condições e eventos

de um sistema é finito, de maneira que ao assumirmos processos contínuos, resulta em um comportamento cíclico que origina a repetibilidade de estados. O determinismo do processo implica que em cada situação, correspondente ao estado global do sistema, somente um evento ocorre sem ambigüidade. Portanto, se um evento ocorrer, a resposta do processo é sempre determinística. O não determinismo advem da limitação do modelo em representar as características do ambiente.

Em virtude das características apresentadas estarem presentes em um SIM, é possível ocorrer alguns fenômenos indesejáveis nestes sistemas: o "deadlock" e a colisão.

A figura 2.8 ilustra a ocorrência de "deadlock" no sistema exemplificado anteriormente pela figura 2.7. Enquanto a máquina está processando uma peça, o robô inicia o processo de carga de uma nova peça que chegou. Desta forma, mesmo que a máquina-ferramenta conclua o processo, não há como descarregar a peça pronta, concretizando-se assim o "deadlock".

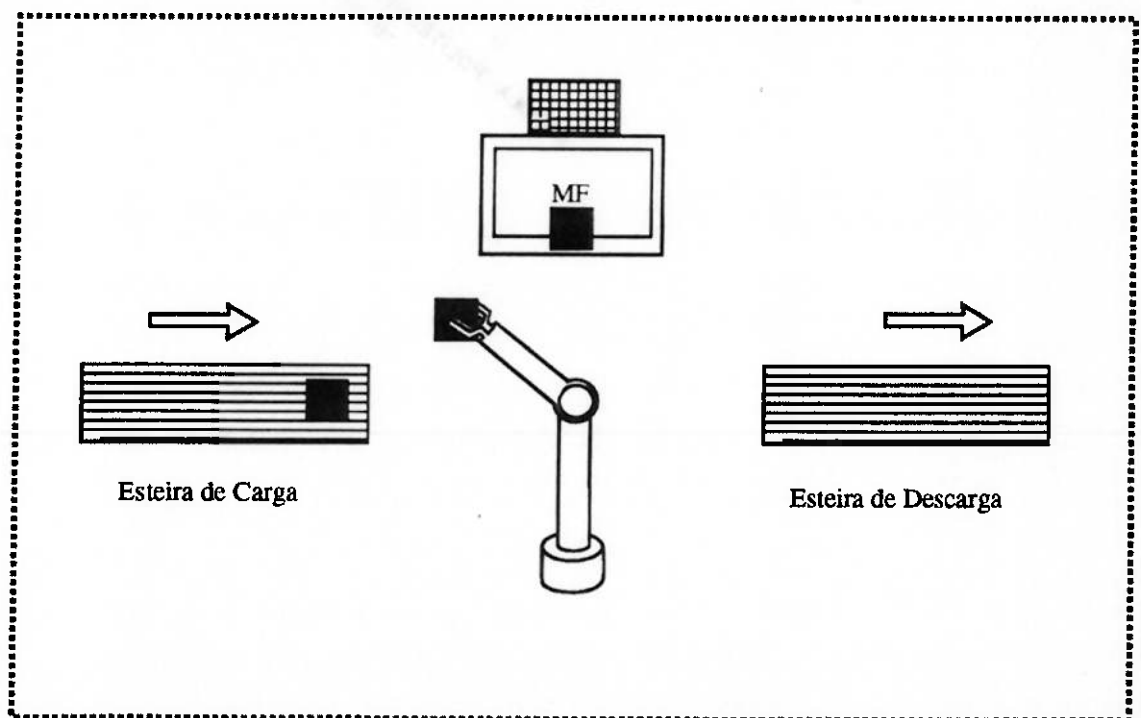


Fig. 2.8 A ocorrência de "deadlock"

Na figura 2.9 o problema corresponde à chegada de peças, consecutivamente, sem haver tempo hábil para que se evite uma colisão no ponto de agarramento da peça pelo robô.

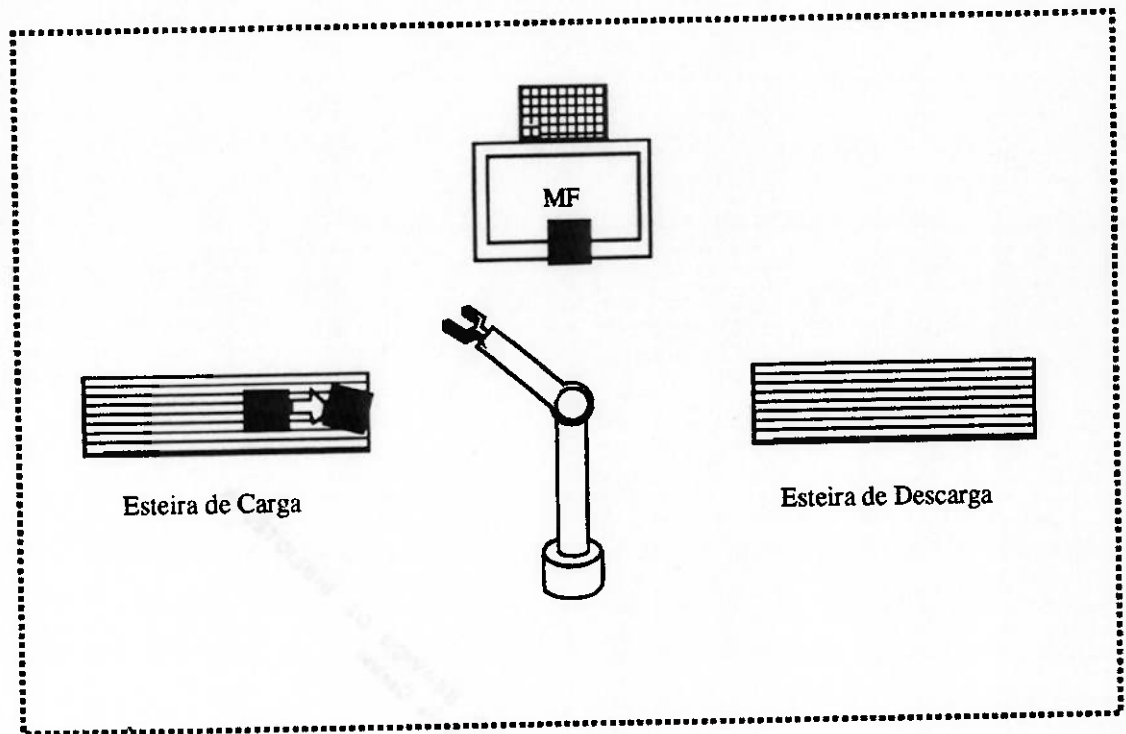


Fig. 2.9 A ocorrência de colisão

A partir das considerações realizadas a respeito do comportamento dinâmico de um SIM conclui-se que é necessário rigor na compreensão destes sistemas para realizar-se uma descrição consistente de seu comportamento.

2.5 SIMs E OS SISTEMAS ANTROPOCÊNTRICOS

Freqüentemente, os sistemas de manufatura modernos são complexos e de grande porte, envolvendo diversas formas de tecnologia através de diferentes modalidades de máquinas e robôs, onde é possível manufaturar simultaneamente uma variedade de produtos.

Em geral, estes sistemas resultam de um complexo arranjo de técnicas e métodos essencialmente experimentais, desenvolvidos pelo homem. Desta forma, é natural que a abordagem baseado em sistemas totalmente automatizados esteja aprefeiçoando-se para uma concepção baseada em sistemas antropocêntricos inteligentes [ITO (1991)].

Em HO (1989) é realizada uma interessante comparação entre dois sistemas de naturezas diferentes: uma nave espacial e um sistema de manufatura automatizada. Se considerarmos o comportamento da nave durante uma viagem inter-planetária, haverá uma forte interação desta com a natureza, conforme comprovam as leis do movimento e gravitação de Newton. Por sua vez, o sistema de manufatura é um sistema aberto, geralmente controlado por computador e que interage intensamente com operadores humanos, através de "displays" e manipuladores, e com o ambiente. Esta comparação esclarece a importância de vincular-se o elemento humano ao sistema de manufatura.

Desta forma, é coerente a hipótese de que há uma tendência dos Sistemas Integrados de Manufatura futuros fundamentarem-se no conceito de sistemas inteligentes especialitas de manufatura. Embora não haja ainda uma definição clara a respeito da configuração destes sistemas, a maioria dos estudos concordam em estabelecer as seguintes características básicas:

- Transporte simultâneo de materiais e informações;
- Aplicação do conceito de modularização para o desenvolvimento de controladores de células e centros de usinagem, considerando-se que os controladores de células são do tipo inteligente e os centros de usinagem são interpretados como estações de trabalho compactas de propósito geral e;

- Capacidade de gerenciamento de informações relacionadas ao conhecimento especialista dos engenheiros experientes e técnicos a fim de realizar sistemas de manufatura inteligentes.

Neste contexto, um controlador de célula avançado deve gerenciar informações baseadas em conhecimento não procedural e que, portanto, envolve a realização de uma série de pesquisas nas áreas de engenharia e computação para o desenvolvimento tecnológico dos sistemas de manufatura.

Capítulo 3

TÉCNICAS DE MODELAGEM DE SIMs BASEADAS EM MFG

3.1 INTRODUÇÃO

Para modelar-se as características estruturais e o comportamento dinâmico de um SIM, apresentadas no Capítulo 2, não há, no presente, um método instituído como padrão. Quando o objetivo é modelar o sistema para controlá-lo, observa-se uma tendência acentuada em adotar-se técnicas gráficas para representar estes sistemas dirigidos por eventos. Essas técnicas devem permitir a modelagem consistente de suas características fundamentais: assincronismo, paralelismo e concorrência.

Para auxiliar o processo de seleção de uma ferramenta adequada para a análise e o projeto de sistemas produtivos automatizados (SIMs) há um conjunto de requisitos básicos fundamentais que devem ser averiguados:

- Capacidade de descrição do comportamento dinâmico do sistema de forma consistente;

- Capacidade de realização de uma descrição hierárquica funcional para uma estruturação do processo de modelagem;
- Disponibilidade de modelos matemáticos eficientes para a análise do sistema e seu projeto;
- Realização adequada e eficiente da interface homem-máquina nos diversos níveis (operadores, planejadores, etc.).

Neste contexto, o Mark Flow Graph, ou simplesmente MFG, é uma destas técnicas que representa uma sub-classe de redes, deduzida a partir de Redes de Petri [MASUDA; HASEGAWA (1980), HASEGAWA et.al. (1984) e MIYAGI et.al. (1989)]. Esta técnica permite expressar-se a estrutura de controle de complexos sistemas de controle seqüencial, sendo considerada uma ferramenta poderosa para a descrição eficiente da estrutura do sistema, para a descrição do comportamento funcional do sistema e para a realização do seu controle. Portanto, um grafo MFG é capaz de representar um modelo global do sistema que denominaremos *modelo estrutural-funcional do sistema*.

Neste capítulo, primeiramente são apresentados os princípios e características do MFG, apresentando os seus elementos estruturais, suas inter-relações e o comportamento dinâmico da marcação. Em seguida são tratados aspectos relacionados à concorrência e conflito de atividades, o seqüenciamento e simultaneidade de eventos e os conceitos de "Safeness", "Deadlock" e "Liveness" aplicados ao MFG.

No sentido de representar a evolução da capacidade e eficiência de modelagem do MFG, apresenta-se o MFG Funcional como resultado de um processo de modularização do mesmo, detalhando-se os aspectos relativos aos "boxes" funcionais.

Finalizando este capítulo apresenta-se a metodologia MFG/PFS, estendendo a aplicação do MFG para a modelagem estruturada e interpretada de sistemas de manufatura de grande porte [MIYAGI (1988)].

3.2 MARK FLOW GRAPH (MFG)

O MFG é um grafo bipartido seguro que apresenta as características fundamentais necessárias para a representação de sistemas seqüenciais complexos.

3.2.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS E SUAS INTER-RELAÇÕES

O MFG é composto pelos seguintes elementos estruturais:

- a) "*Box*": o "box" corresponde a uma condição que pode estar associada ao modo de operação ou à disponibilidade de um elemento do sistema. É representado por um bloco quadrado no grafo (Fig. 3.1(a)).
- b) *Transição*: a transição corresponde a um evento que causa uma mudança de estado do sistema. É representada por uma barra vertical no grafo (Fig. 3.1(b)).
- c) *Arco orientado*: a relação entre um "box" e uma transição é representada por um arco orientado que conecta estes dois elementos. Para cada condição existe um pré-evento e um pós-evento que a define. Os arcos são representados por setas, de acordo com a Fig. 3.1(c). Os arcos de saída são aqueles que saem de um "box" ou transição e que portanto estão do lado de saída destes elementos. Por sua vez, os arcos de entrada estão do lado de entrada destes elementos, entrando nos "boxes" ou transições.
- d) *Marca*: a manutenção de uma condição é representada pela existência de uma marca no "box" correspondente (Fig. 3.1(d)). A alocação de marcas nos "boxes" do grafo constitui a sua marcação.

e) *Porta (gate)*: pode ser uma porta habilitadora ou inibidora que desempenha a função de habilitar ou inibir a ocorrência dos eventos correspondentes às transições a que estão conectadas. A porta habilitadora é representada por um arco com um círculo negro na extremidade que a conecta à transição (Fig. 3.1(e)). Se o sinal de origem desta porta for "1", a transição a ela conectada é habilitada, dependendo apenas das demais condições, compondo desta forma um AND lógico de todas as condições associadas a esta transição. Por sua vez, a porta inibidora é representada por um arco com um círculo branco na extremidade que a conecta à transição (Fig. 3.1(f)). A presença de um sinal "1" como origem inibe a transição, realizando-se portanto um OR lógico com as demais condições associadas a esta transição, no sentido de habilitá-la (aplica-se o teorema de De Morgan). As portas podem ainda ser sub-classificadas em portas externas e portas internas. Uma porta interna possui como sinal de origem um "box" do próprio grafo (o sinal de origem faz parte do modelo). A existência de uma marca no "box" corresponde ao sinal "1"; se não existirem marcas o sinal é interpretado como "0". Uma porta externa representa um dispositivo que não faz parte do modelo. O sinal de origem associado a esta porta é gerado por um dispositivo externo a partir de um sinal binário.

f) *Arco de sinal de saída*: corresponde a um arco que se origina de um "box" e envia a informação deste "box" para um elemento externo (Fig. 3.1(g)). Se houver marca no "box", envia o sinal "1", caso contrário, envia o sinal "0".

Os sistemas modelados por MFG são do tipo condição evento. Desta forma, presupõe-se que para ocorrer um determinado evento seja necessário a obediência de determinadas condições, estabelecendo-se a relação causal existente entre condição e evento para a evolução dinâmica do sistema. Por sua vez, no modelo MFG equivalente do sistema, as transições correspondem aos eventos e os "boxes" correspondem às condições e, portanto, o grafo é composto a partir da conexão de transições e "boxes" alternadamente, através de arcos orientados.

Entre cada par <transição-"box"> ou cada par <transição-sinal de origem externa> pode existir apenas um único arco. Entretanto, permite-se um número ilimitado de arcos entrando ou saindo dos "boxes" ou transições.

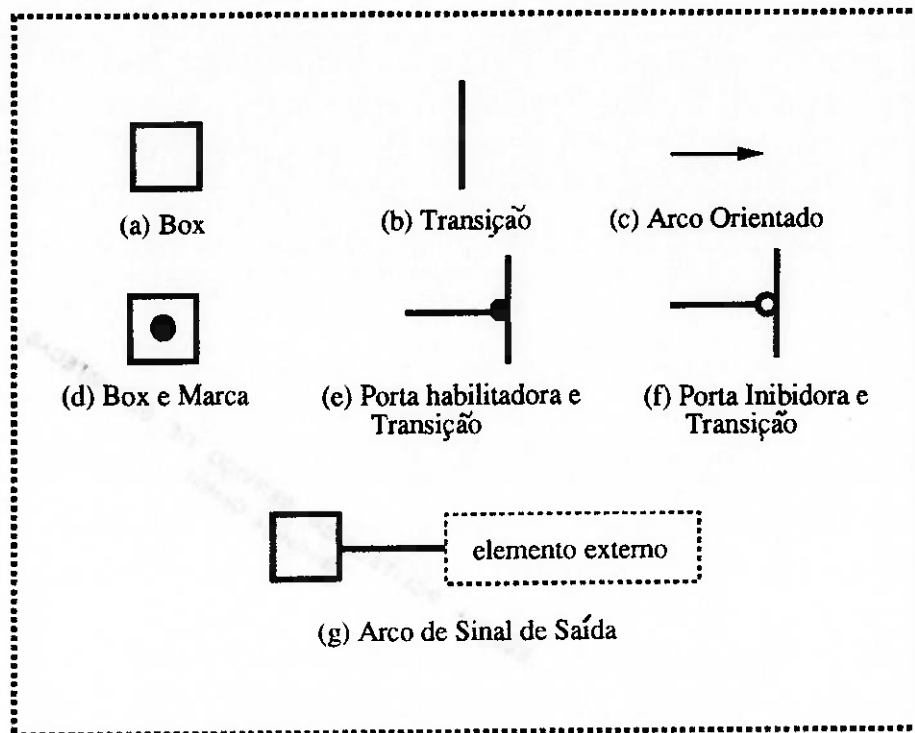


Fig. 3.1 Elementos estruturais básicos do MFG

3.2.2 A DINÂMICA DAS MARCAS NO GRAFO MFG

O estado de um sistema modelado em MFG pode ser interpretado pela disposição das marcas no grafo a cada instante. Cada um dos possíveis arranjos de marcas denomina-se marcação. A marcação inicial é determinada pela alocação inicial de marcas no grafo e corresponde ao estado inicial do sistema (se não forem alocadas marcas, denomina-se "marcação inicial-0"). Esta marcação inicial deve limitar-se a no máximo 1 marca em cada "box".

O comportamento dinâmico do sistema é representado pela evolução das marcas no grafo que está subordinada à ocorrência de eventos. Para realizar esta evolução de marcas, são estabelecidas regras para o disparo das transições correspondente à ocorrência de eventos.

Uma transição é denominada "*transição habilitada*" e está habilitada para o disparo se satisfazer todas as condições citadas a seguir:

- Todos os "boxes" de entrada desta transição encontram-se marcados;
- Todos os "boxes" de saída desta transição não estão marcados;
- Todas as portas habilitadores internas apresentam sinal de origem igual a "1" e,
- Todas as portas inibidores internas apresentam sinal de origem igual a "0".

Caso uma transição desobedeça alguma dessas condições é denominada "*transição desabilitada*".

Para que ocorra o disparo desta transição é necessário que obedeça a outras duas condições para caracterizá-la como "*transição disparável*". Uma transição é denominada "*transição disparável*" se for uma transição habilitada e apresentar:

- Todas as portas habilitadoras externas no estado *habilitado* e,
- Todas as portas inibidoras externas no estado *desabilitado*.

Se uma transição é disparável então ocorre o seu disparo de forma imediata e instantânea (supondo que não haja conflito ou atrasos de tempo)¹. Isto significa que o disparo ocorre em um intervalo de tempo infinitamente pequeno. A Fig. 3.2 ilustra um exemplo de disparo.

¹A introdução do conceito de tempo no grafo MFG e as relações de concorrência e conflito serão discutidas posteriormente.

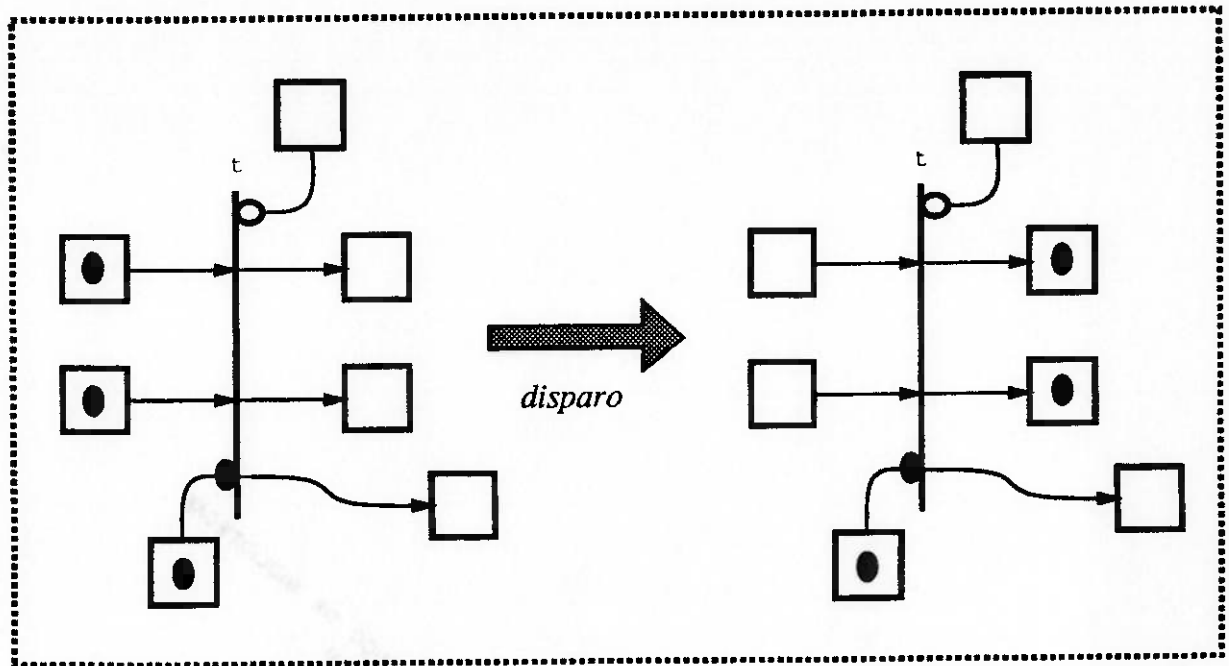


Fig. 3.2 Exemplo de disparo de uma transição

O disparo de uma transição remove as marcas de todos os seus "boxes" do lado de entrada e coloca marcas em todos os seus "boxes" do lado de saída.

3.2.3 RELAÇÕES DE CONCORRÊNCIA E CONFLITO

Uma importante característica das redes condição-evento refere-se ao indeterminismo na presença de um conflito. Segundo REISIG (1992) dois eventos de uma rede condição-evento estão em conflito se ambos estão ativados e a ocorrência de um deles implica na desativação do outro.

A Fig 3.3 ilustra o "box"-conflito em MFG: quando a relação de concorrência for no lado de entrada do "box"-conflito, há um "box"-conflito de entrada. Se estiver no lado de saída, há um "box"-conflito de saída. Portanto, se em determinado instante mais de uma das transições de um "box"-conflito estão habilitadas, caracteriza-se a situação de conflito [MIYAGI et.al. (1989)].

3.2.4 SEQÜENCIAMENTO E SIMULTANEIDADE DE EVENTOS

Para a modelagem de um sistema a partir dos elementos estruturais básicos que compõem o MFG, não há uma preocupação em representar-se o tempo como elemento determinante para a evolução das marcas no grafo. No Capítulo 2 este fato foi evidenciado quando se atribuiu o conceito de variável independente (que o tempo assume para os SVCs) para a seqüência de eventos a que estão subordinados os sistemas produtivos discretos (classe de SEDs). De fato, em um sistema dirigido por eventos, a ocorrência destes eventos vincula-se a determinadas condições e não ao tempo. Portanto, parece que não há dúvidas em questionar-se a respeito da simultaneidade de eventos.

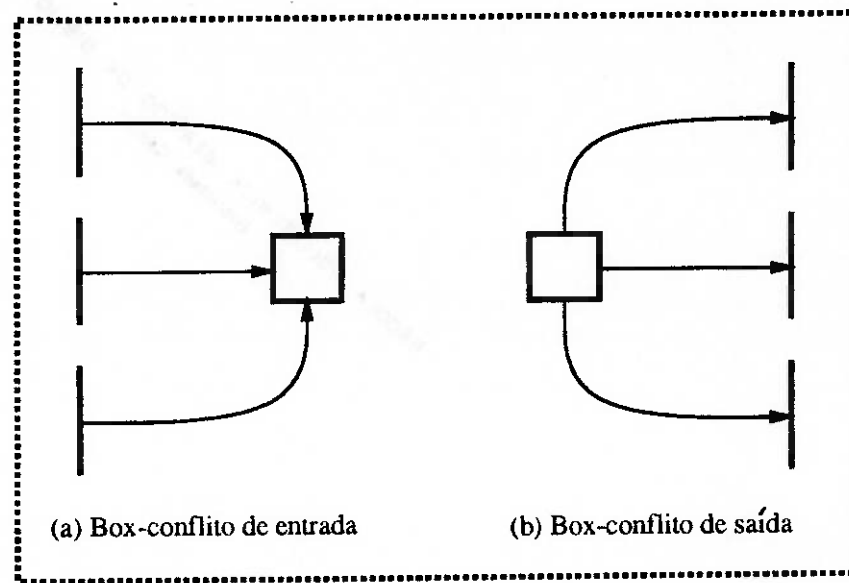


Fig. 3.3 Exemplo de "box"-conflito

Em situações de conflito, é evidente que não há simultaneidade, pois os eventos são mutuamente exclusivos. Entretanto, considere o exemplo da Figura 3.4, derivado de REISIG (1992). Neste sistema observa-se que os eventos *iniciar processo1* (representado por t_1) e *iniciar processo2* (representado por t_3) são independentes. Portanto, é possível ocorrer o seqüenciamento *PROC1-PROC2*, ou o seqüenciamento *PROC2-PROC1*, ou ainda considerar a simultaneidade destes

dois processos considerando que os eventos para o início de *PROC1* e *PROC2* ocorrem simultaneamente.

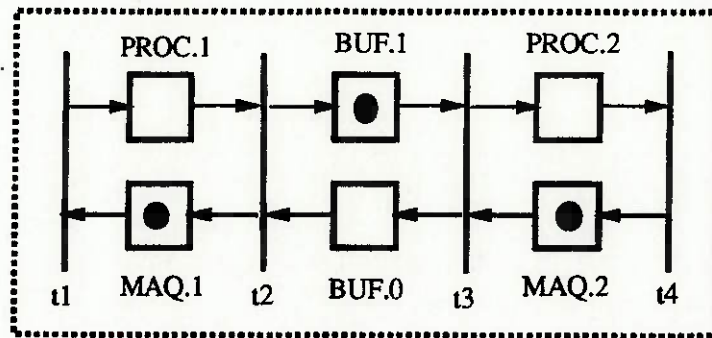


Fig. 3.4 Exemplo de sistema composto por duas máquinas e um "buffer"

A princípio estas hipóteses parecem coerentes, mas avaliando-se com cuidado obtêm-se algumas conclusões interessantes:

- Se o objetivo é medir o tempo de ocorrência dos eventos, há problemas de ordem física envolvidos (precisão dos instrumentos e localização dos elementos envolvidos). Uma consequência imediata é que a hipótese de associar-se tempo para a ocorrência dos eventos implicaria na solução do indeterminismo temporal que caracteriza estes sistemas produtivos dirigidos por eventos. Portanto, deve-se evitar mencionar o termo "simultaneidade de eventos"²;
- Se o objetivo for restringir as possibilidades de seqüenciamento, basta impôr regras de controle para arbitrar em favor de um determinado seqüenciamento³.

Portanto, o paralelismo, a concorrência e o conflito de eventos devem ser modelados sem que haja ambigüidades quanto à avaliação do tempo para a descrição da evolução dinâmica do sistema.

²Posteriormente veremos como tratar o problema de sincronização de eventos.

³No Capítulo 4 são apresentadas regras de controle para gerenciar o fluxo de materiais.

3.2.5 SEGURANÇA ("SAFENESS")

Para afirmar-se que um grafo MFG é seguro ("safe"), no sentido de evitar o problema de "bumping", é necessário garantir que o número de marcas nos "boxes" seja no máximo 1.

A condição inicial do sistema é representada a partir da marcação inicial do grafo e é sabido que não deve exceder 1 marca por "box". Quanto às regras de disparo, uma transição só está habilitada se não houver marcas em seus "boxes" do lado de saída, preservando desta forma a condição de não acumular mais de uma marca nos "boxes", após o disparo. Considerando a hipótese da marcação inicial e das regras de disparo, garante-se que um grafo MFG é seguro.

3.2.6 ELEMENTOS TEMPORIZADOS

Para representar o tempo de duração de processos, por exemplo, dispõe-se do "box" temporizado que retém a marca durante um intervalo de tempo pré-definido. A Figura 3.5(a) representa um "box" temporizado.

Outra alternativa é utilizar a transição temporizada que atrasa o disparo de um intervalo de tempo pré-definido, medido a partir do instante em que as condições de disparo são satisfeitas. A Figura 3.5(b) representa uma transição temporizada. Se as condições de disparo deixarem de ser obedecidas antes que transcorra o intervalo de tempo especificado, a transição é desabilitada e a contagem de tempo volta para zero.

3.2.7 "DEADLOCK" E "LIVENESS" NO MFG

O conceito de "deadlock" foi introduzido inicialmente no Capítulo 2. Dizer que um sistema está em "deadlock" significa que se atingiu um estado em que há um travamento do processo, causado por funcionamento inadequado do sistema.

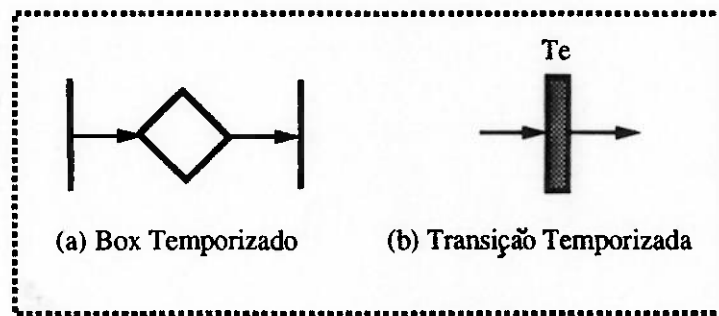


Fig. 3.5 Elementos temporizados

Se o sistema apresenta um comportamento dinâmico adequado, evitando-se situações de "deadlock", o seu grafo MFG correspondente possui a propriedade de ser "live" (vivo).

No grafo MFG, o estado de "deadlock" é caracterizado por uma marcação em que não há nenhuma transição habilitada (estado do sistema travado), atingida a partir da marcação inicial (estado inicial), após a ocorrência de uma seqüência de disparos de transições (correspondente aos eventos ocorridos no sistema).

Para evitar-se a situação indesejável de travamento do processo produtivo, é necessário avaliar com rigor as causas que provocam o "deadlock" no sistema. A realização de um processo de análise para a detecção de "deadlock" em um grafo MFG estabelece a distinção de duas naturezas de "deadlock": o "deadlock" condicional e o "deadlock" estrutural.

O "deadlock" estrutural está relacionado a problemas na própria estrutura do grafo. Considerando que um grafo MFG é um modelo estrutural-funcional do sistema, o problema está em não estabelecer corretamente um modelo que

represente suas propriedades estruturais de forma consistente. Neste contexto, não importa o estado inicial atribuído ao sistema (marcação inicial), o resultado será a inevitável ocorrência de "deadlock".

O "deadlock" condicional é causado por falhas na modelagem da dinâmica do sistema. O problema do grafo está na forma como as marcas evoluem a partir de determinadas marcações iniciais. Portanto, a causa reside no comportamento funcional do sistema que, para determinadas marcações iniciais inadequadas, pode alcançar estados de "deadlock" e, para outras, é um sistema vivo.

Desta forma, a partir da análise do modelo MFG equivalente do sistema, é possível orientar-se quanto à vivacidade do modelo e, conseqüentemente, avaliar qualitativamente o comportamento dinâmico do sistema.

3.3 O MFG FUNCIONAL (F-MFG)

Os princípios e características do MFG apresentados, revelam sua potencialidade para a representação de sistemas produtivos dirigidos por eventos. Em MASUDA; HASEGAWA (1980) é realizado um estudo relacionando o MFG e outras técnicas baseadas em grafos, tais como os grafos de PERT, os diagramas de estado e as Redes de Petri. Entretanto, representar um sistema em MFG pode ser uma tarefa estafante, à medida que se eleva o grau de complexidade desse sistema. O motivo deste problema é a necessidade de considerar-se no modelo, diversos detalhes pertinentes à nível de chão de fábrica. Em computação há um problema análogo: a utilização de linguagens de baixo nível (nível de máquina) para o desenvolvimento de programas de grande porte.

Para simplificar a representação do modelo, o ponto de partida foi averiguar a capacidade funcional dos diversos dispositivos do sistema e o grau de participação nos processos produtivos. Em sistemas discretos de manufatura são

freqüentes as interações de dispositivos de estoque e armazenagem temporária para transporte e manipulação de materiais. Para modelar-se estes dispositivos de forma a facilitar o modelo MFG global do sistema, definiu-se macro-elementos a partir dos elementos básicos que definem a estrutura do MFG. Neste processo de modularização foram propostos três módulos básicos: o "box" capacidade, o "box" agrupador e o "box" dispersor [HASEGAWA; TAKAHASHI (1987)].

3.3.1 O BOX CAPACIDADE

O "box" capacidade representa um dispositivo armazenador do tipo FIFO ("First-in First-out") com capacidade de armazenar no máximo N ítems. Sua estrutura está ilustrada na Figura 3.6, composta por uma sucessão de N "boxes" e sua representação encontra-se na Tabela 3.1. Maiores detalhes quanto à dinâmica de disparo das transições de entrada e saída deste "box" e seu comportamento em relação a ativação de portas habilitadoras e inibidoras encontram-se também na Tabela 3.1.

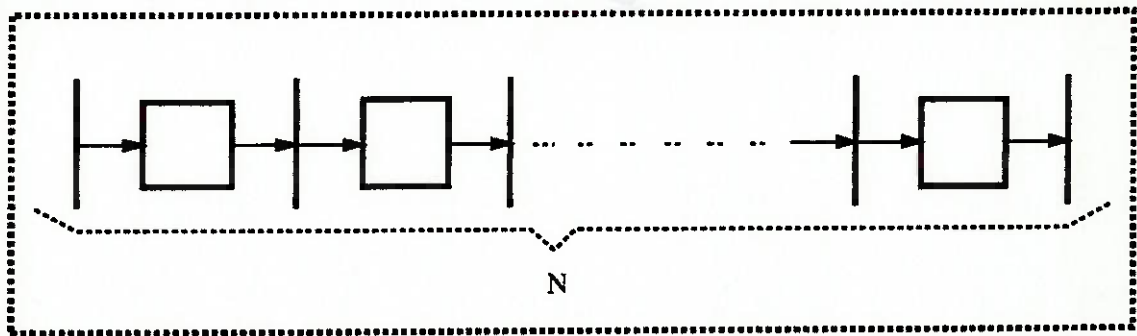


Fig. 3.6 Estrutura do "Box" Capacidade

3.3.2 O "BOX" AGRUPADOR

O "box" agrupador representa uma operação de agrupamento de peças em um "pallet", por exemplo. A Figura 3.7 representa a estrutura deste módulo formado por um número específico de "boxes" N, conectados de forma a permitir o disparo da transição de saída somente após a chegada de todas as N marcas, correspondentes às N peças. A Tabela 3.1 contém a representação deste módulo, as regras de disparo e a sua interação com portas habilitadoras e inibidoras.

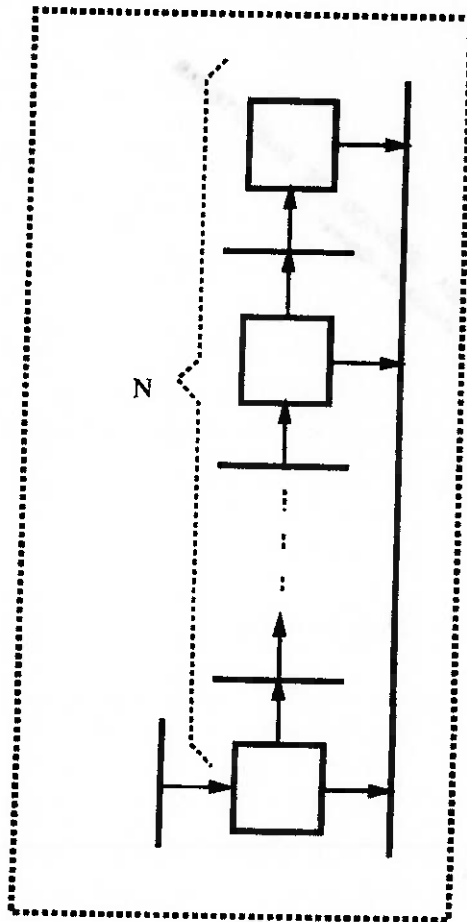


Fig. 3.7 Estrutura do "Box" Agrupador

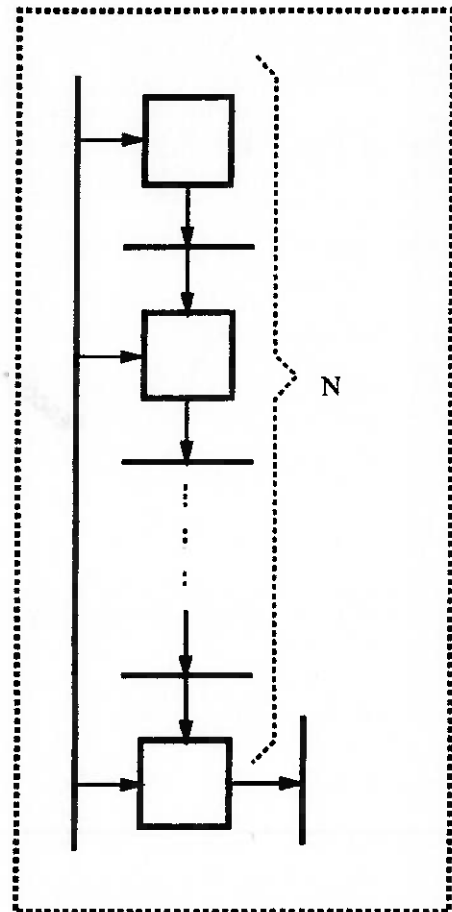


Fig. 3.8 Estrutura do "Box" Dispensor

3.3.3 O "BOX" DISPERSOR

O "box" dispersor representa a operação inversa de um "box" agrupador, relacionando-se, por exemplo, a um processo de "despalletização". Sua estrutura é ilustrada na Figura 3.8, formada por um número específico de "boxes" N , em que a transição de entrada não dispara enquanto houver algum "box" marcado. A tabela 3.1 fornece as informações complementares necessárias. Nesta tabela a variável n representa o número de marcas contidas no "box" e N é um parâmetro específico para cada tipo de atividade (capacidade, tamanho do "pallet"). É interessante observar que o comportamento do sinal das portas habilitadora e inibidora é idêntico para o "box" capacidade, o "box" agrupador e o "box" dispersor.

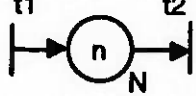
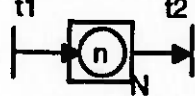
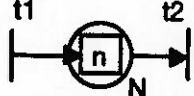
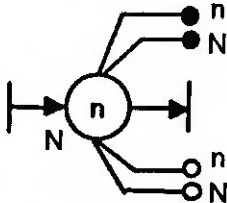
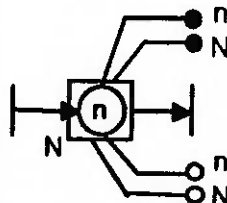
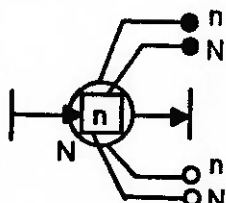
3.3 PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS)

O MFG Funcional foi o primeiro passo realizado no sentido de aperfeiçoar o MFG como ferramenta para a modelagem de sistemas produtivos discretos complexos. Este aperfeiçoamento entende-se por maior adequação desta ferramenta para a obtenção de modelos mais simples, com menor número de elementos, de forma a facilitar a compreensão e representação de sistemas de maior complexidade. Entretanto, apesar desta contribuição, há a necessidade de associar-se uma interpretação ao modelo MFG. Esta necessidade é mais premente na modelagem de sistemas de maior porte, em virtude da característica de "linguagem de máquina", ainda presente no MFG Funcional. No sentido de proporcionar uma interpretação ao MFG, em MIYAGI (1988) é proposta uma metodologia de abordagem hierárquica para a modelagem de SIMs, baseada em Production Flow Schema (PFS).

Expressar o comportamento dinâmico de um sistema através de um modelo MFG implica na representação detalhada de todas as condições exigidas para que os eventos ocorram adequadamente. Para sintetizar este modelo a partir de uma

abordagem unidimensional (apenas à nível de detalhe de operação das máquinas) tem-se uma tarefa bastante complicada, em virtude do formalismo necessário para especificar a dinâmica do sistema através dos elementos estruturais básicos do MFG.

Tabela 3.1 Os macro-elementos do MFG Funcional

	Box capacidade	Box agrupador	Box dispersor
<p>símbolo: N = capacidade total das marcas n = número de marcas presente</p> 			
condição necessária para disparo de t1	$n < N$	$n < N$	$n = 0$
condição necessária para o disparo de t2	$n > 0$	$n = N$	$n > 0$
resultado do disparo de t1	$n(\text{depois}) = n(\text{antes}) + 1$	$n(\text{depois}) = n(\text{antes}) + 1$	$n(\text{depois}) = N$
resultado do disparo de t2	$n(\text{depois}) = n(\text{antes}) - 1$	$n(\text{depois}) = 0$	$n(\text{depois}) = n(\text{antes}) - 1$
<p>símbolo: N = capacidade total das marcas n = número de marcas presente</p> 			
porta habilitadora indicado por n	habilita quando $n > 0$		
porta habilitadora indicado por N	habilita quando $n = N$		
porta inibidora indicado por n	inibe quando $n > 0$		
porta inibidora indicado por N	inibe quando $n = N$		

A solução é adotar como ponto de partida redes que exigem um menor grau de formalismo, para representar o sistema a nível conceitual. Essas redes são denominadas *redes canal-agência* [REISIG (1992)]. O PFS é uma classe destas redes, adequada para a modelagem de sistemas produtivos.

3.4.1 OS ELEMENTOS ATIVIDADE E DISTRIBUIÇÃO

O PFS caracteriza um sistema a partir de seu fluxo de materiais e informações. Esta abordagem baseia-se no princípio de que um sistema é composto por elementos ativos que realizam as transformações dos materiais e elementos passivos que realizam a distribuição destes materiais, havendo, portanto, uma inter-relação entre estes elementos para a realização efetiva dos fluxos de itens presentes no sistema.

Desta forma, a estrutura do PFS baseia-se em três elementos fundamentais:

- Elemento Atividade;
- Elemento Distribuidor e
- Arcos Orientados (para a conexão destes elementos).

O elemento atividade representa um componente ativo do sistema, capaz de realizar ações relativas à produção, transporte e modificação de itens. A Figura 3.9 ilustra este elemento: corresponde a um macro-elemento delimitado por "[" e "]", havendo inscrições em linguagem natural ou formal para especificá-lo. Os arcos orientados conectados diretamente aos símbolos "[" e "]", representam o fluxo

principal, enquanto os arcos conectados à parte interna da atividade representam o fluxo secundário.

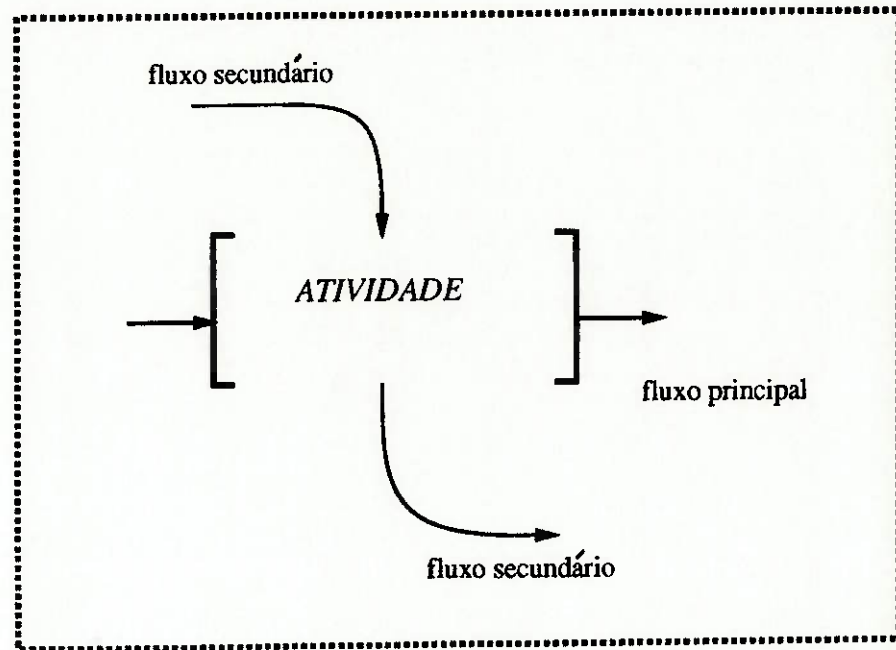


Fig. 3.9 Elemento Atividade

O elemento distribuidor representa um componente passivo do sistema que não realiza transformação de materiais, mas apenas é capaz de armazenar itens para serem posteriormente processados ou transportados por elementos atividade. A Figura 3.10 representa este elemento por um círculo com diversos arcos orientados conectados.

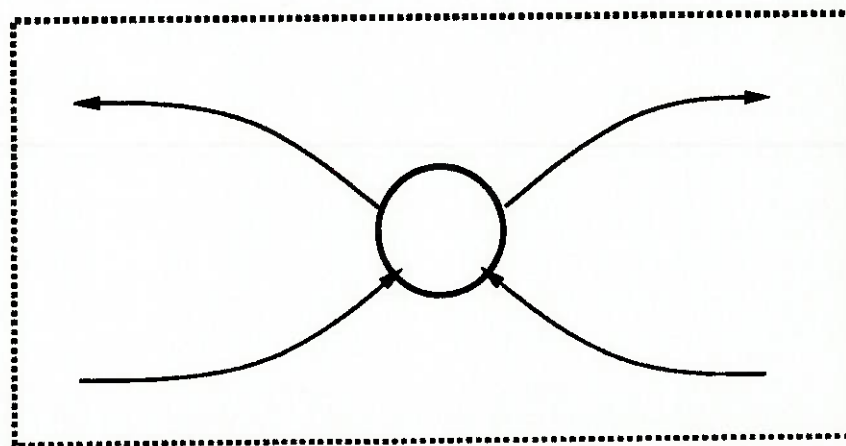


Fig. 3.10 Elemento Distribuidor

Como exemplo, a Figura 3.11(a) ilustra um sistema produtivo formado por um robô manipulador e duas máquinas-ferramenta CNC: um torno e uma fresadora. Há um magazine de entrada, um intermediário e outro de saída. O robô realiza o fluxo das peças, alimentando as máquinas e depositando as peças nos magazines apropriados. O modelo PFS correspondente é apresentado na Figura 3.11(b).

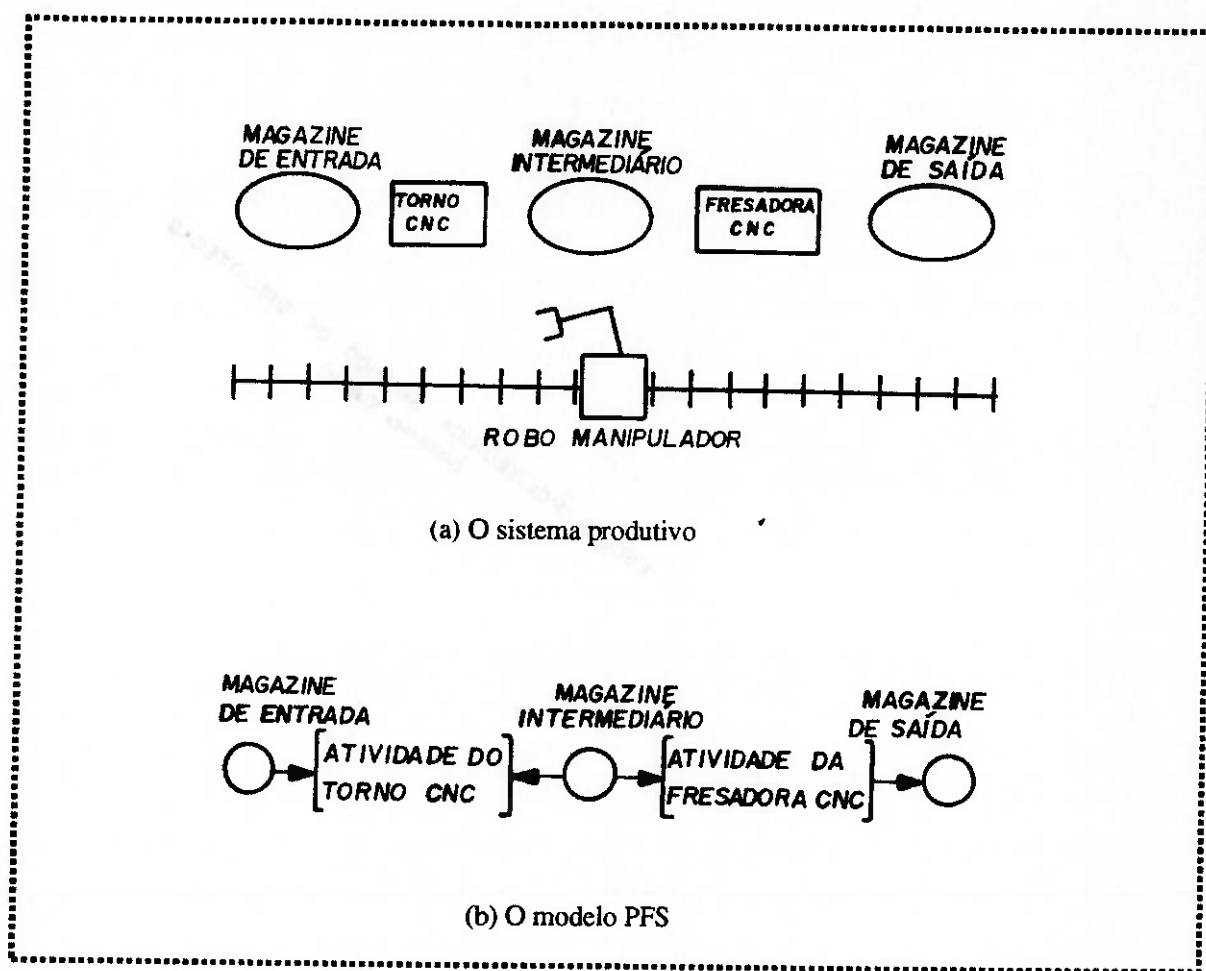


Fig. 3.11 Exemplo de sistema produtivo e seu modelo PFS

3.4.2 REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS PFS EM MFG

O elemento atividade pode ser representado em MFG por um "box" em que "[" será o pré-evento e "]" será o pós-evento, indicando o início e término da atividade, respectivamente.

A partir de elementos estruturais básicos do MFG e de acordo com a Tabela 3.1, é possível representar quatro naturezas de atividades, que podem ser interpretadas em PFS da seguinte forma:

- *Atividade Unitária;*
- *Atividade de Início Simultâneo;*
- *Atividade de Término Simultâneo e*
- *Atividade de Início e Término Aleatórios.*

A atividade unitária é modelada por um "box" do MFG e que portanto só admite uma marca, ou seja, apenas uma atividade pode ser executada a cada instante (Fig. 3.12(a)).

A atividade de início simultâneo corresponde a processos modelados pelo "box" dispensor. O pré-evento determina o início simultâneo de N atividades e o pós-evento determina a finalização seqüencial destas atividades (Fig. 3.12(b)).

A atividade de término simultâneo corresponde a processos modelados pelo "box" agrupador. O pré-evento determina o início seqüencial da execução de N atividades e o pós-evento determina o término simultâneo das N atividades (Fig. 3.12(c)).

Por sua vez, a atividade de início e término aleatórios corresponde a processos modelados pelo "box" capacidade. Neste caso é possível realizar-se a execução de até N atividades simultaneamente, iniciadas por um mesmo pré-evento e finalizadas por um mesmo pós-evento (Fig. 3.12(d)).

O elemento distribuidor é representado por um "box" capacidade em que o parâmetro N é especificado de acordo com a capacidade de armazenagem do distribuidor.

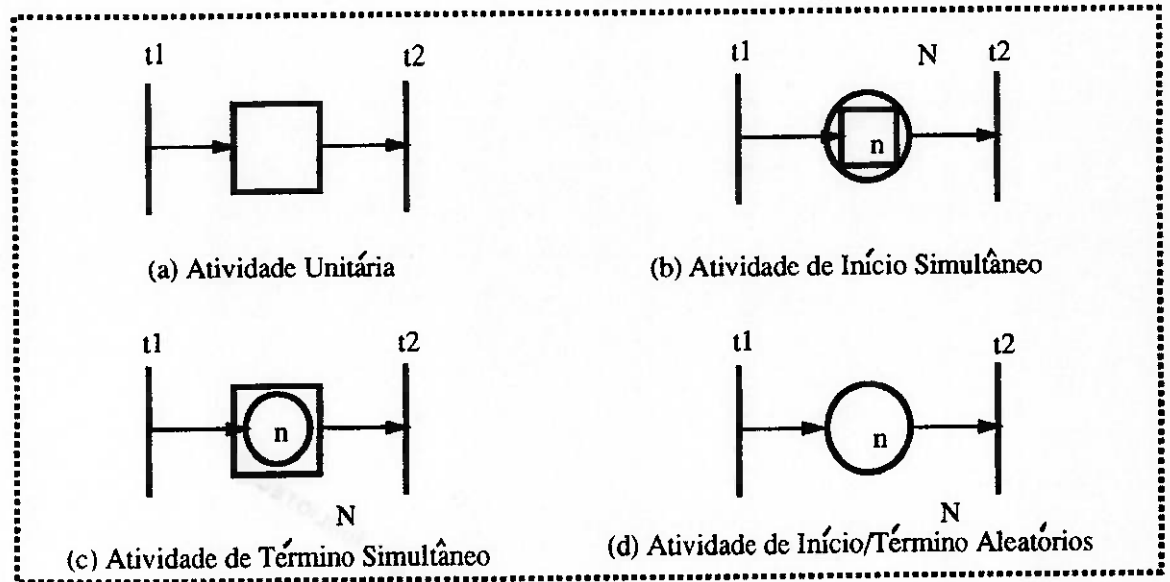


Fig. 3.12 Representação dos elementos atividade em MFG

3.4.3 MODELAGEM DA HIERARQUIA FUNCIONAL

A realização do processo de representação de um modelo MFG a partir de um modelo PFS do sistema, gera um modelo MFG interpretado que contribui decisivamente no sentido de facilitar e estruturar o processo de modelagem de sistemas produtivos dirigidos por eventos. Desta forma introduziu-se uma metodologia para a obtenção de modelos MFG/PFS em que se inicia a modelagem através de um modelo PFS conceitual, evoluindo-se para um modelo híbrido contendo elementos PFS e MFG (durante o processo de detalhamento do modelo) até obter-se o modelo MFG a "nível de máquina", correspondente ao nível hierárquico funcional de chão de fábrica.

Entretanto, durante o processo de detalhamento de uma atividade, é necessário manter a validade do princípio da repetibilidade de estados: o modelo MFG correspondente a uma determinada atividade deve retornar ao seu estado inicial após finalizar-se a referida atividade [SILVA (1986)]. Baseado neste conceito não é permitido a invasão ou vazamento de marcas em uma atividade, conforme ilustra a Figura 3.13. Como pode-se observar, se estas estruturas fossem permitidas, poderiam gerar "deadlock" no sistema.

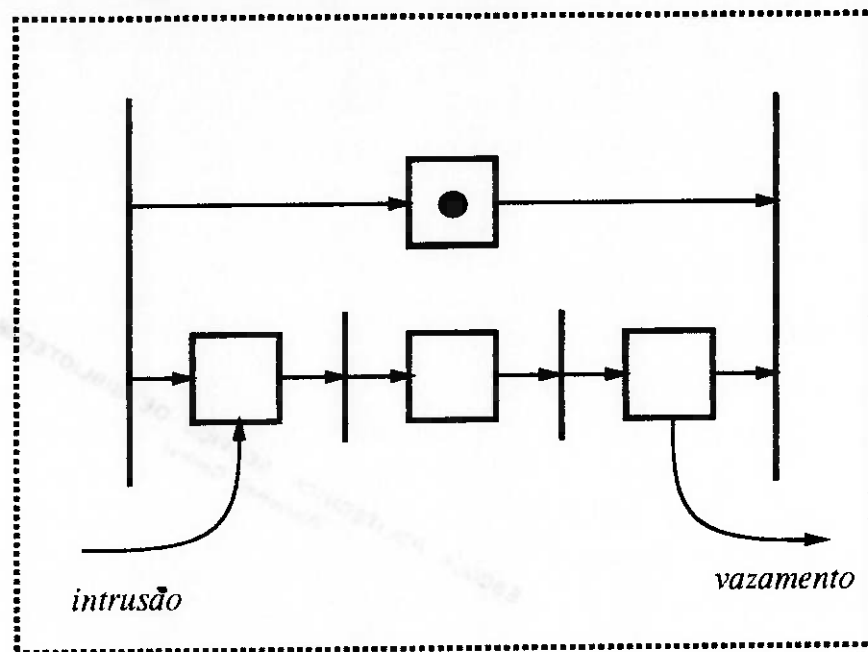


Fig. 3.13 Exemplo de estruturas não permitidas.

Para exemplificar a aplicação da metodologia MFG/PFS considere o exemplo da Figura 3.11. Considere que o torno dispõe de um conjunto de três ferramentas que podem ser trocadas automaticamente, sendo capaz de toronar uma peça de cada vez. Quanto à fresadora, suponha que haja apenas uma ferramenta disponível e que a atividade de fresagem seja executada em uma peça de cada vez. A partir da Fig. 3.11(b) aplica-se a metodologia MFG/PFS refinando-se sucessivamente o modelo. O procedimento é ilustrado passo a passo nas Figuras 3.14 a 3.17.

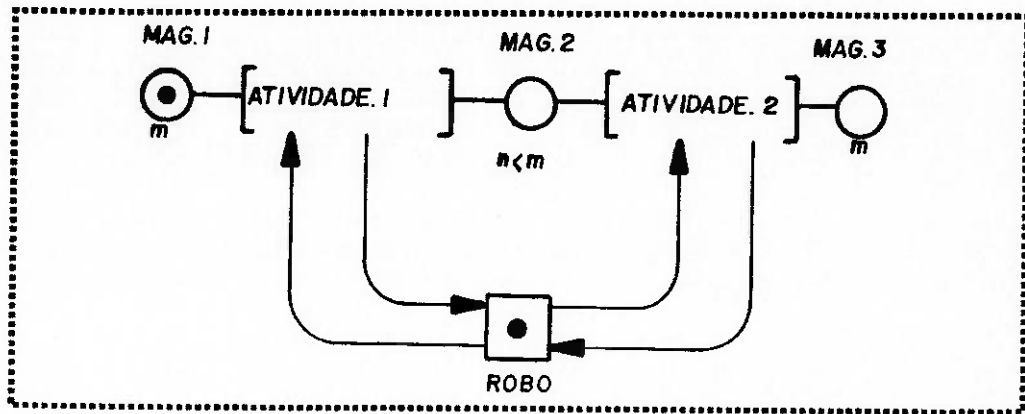


Fig. 3.14 Modelo MFG/PFS correspondente ao primeiro nível

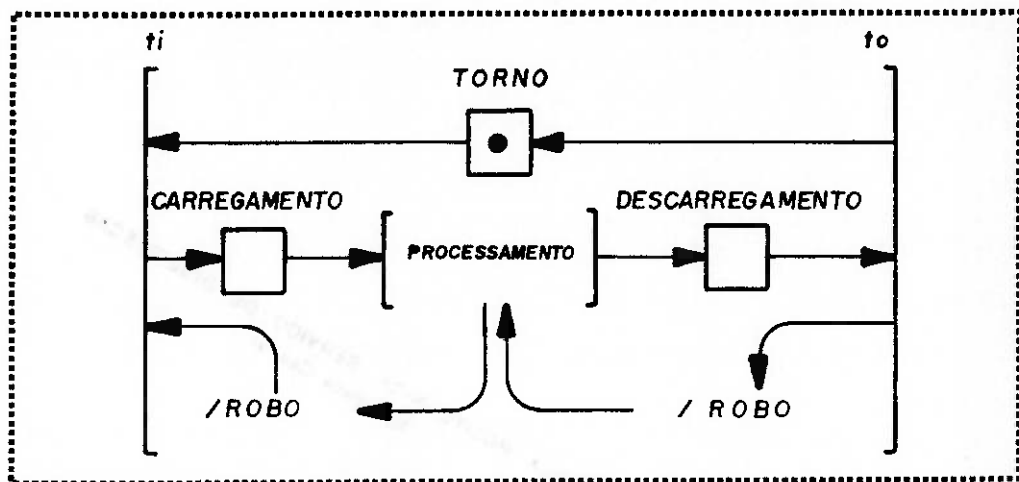


Fig. 3.15 Modelo MFG/PFS correspondente à ATIVIDADE.1

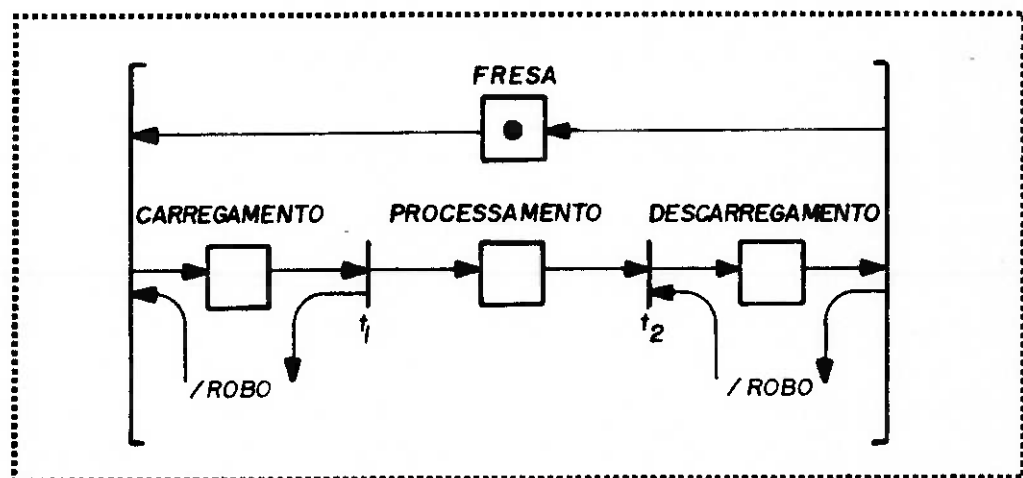


Fig. 3.16 Modelo MFG/PFS correspondente à ATIVIDADE.2

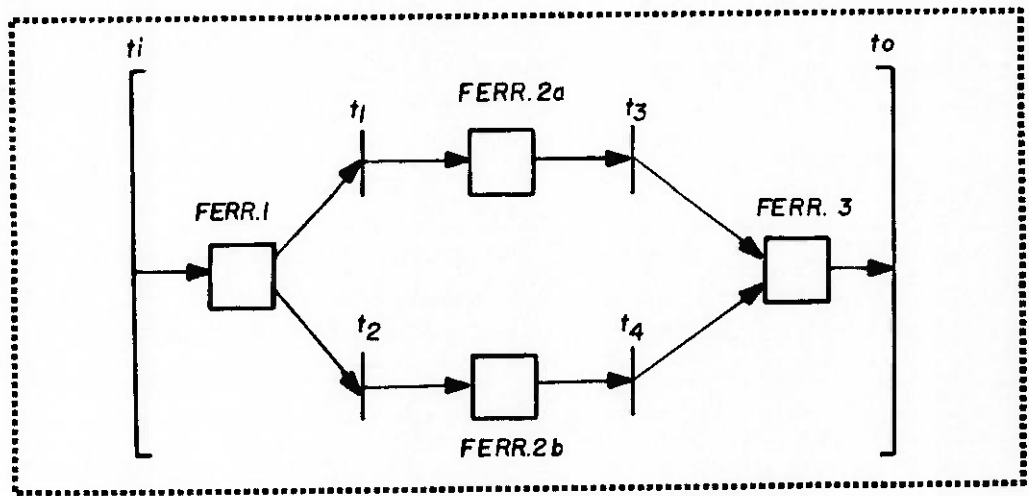


Fig. 3.17 Modelo MFG/PFS correspondente à *PROCESSAMENTO*

Capítulo 4

MARK FLOW GRAPH ESTENDIDO (E-MFG)

4.1 INTRODUÇÃO

Vários trabalhos vem sendo desenvolvidos no sentido de aplicar-se técnicas baseadas em Mark Flow Graph (MFG) para a modelagem e especificação do controle de sistemas de manufatura. A metodologia MFG/PFS é uma ferramenta fundamental para realizar a modelagem de um sistema produtivo de forma eficiente e simplificada, no sentido de obter-se um modelo MFG interpretado a partir do PFS, permitindo, desta forma, a manutenção e controle de sistemas de maior porte.

As investigações realizadas no sentido de aplicar-se esta ferramenta a sistemas de manufatura cada vez mais complexos, que exigem a representação de estratégias de controle mais elaboradas, compatíveis com os níveis de flexibilidade apresentados, evidenciam uma limitação desta ferramenta: se as regras de controle são muito complexas, esta complexidade dificulta a construção do modelo MFG correspondente, abdicando-se da facilidade de interpretação do sistema a partir do modelo.

Este impasse revelou-se em forte motivação para se propor extensões ao MFG no sentido de aperfeiçoar seu poder de modelagem de Sistemas Integrados de Manufatura. Neste contexto, propõe-se o "MFG Estendido", ou simplesmente, E-MFG, como ferramenta de modelagem baseada em marcas individuais e regras adicionais para o controle do disparo das transições.

Esta técnica objetiva conciliar as vantagens disponíveis em uma ferramenta de nível mais alto, possibilitando uma descrição mais adequada e consistente das características dinâmicas específicas dos sistemas produtivos dirigidos por eventos, mas que resguarda as propriedades das redes condição-evento para a realização do controle [REISIG, 1992].

Neste capítulo apresenta-se, inicialmente, uma explanação a respeito da limitação do poder de modelagem do MFG Funcional, relevando-se aspectos relacionados à capacidade de representação dos níveis de flexibilidade de um sistema. A seguir, descreve-se os elementos estruturais básicos do E-MFG e o comportamento dinâmico da marcação destes grafos, detalhando-se aspectos relacionados à manipulação das marcas e regras de disparo das transições. Por fim, aplica-se o E-MFG na descrição de um exemplo de sistema produtivo para destacar a flexibilidade e as limitações desta nova ferramenta. Neste sentido, o capítulo é concluído realizando-se uma comparação das características fundamentais do MFG Funcional (F-MFG) e do E-MFG.

4.2 A FLEXIBILIDADE DO F-MFG

A metodologia MFG/PFS apresentada no Capítulo 3, fundamenta-se em uma abordagem hierárquica com base em sucessivos refinamentos para detalhar-se o modelo de forma progressiva e estruturada. Entretanto, há situações em que uma simples partição do sistema em sub-sistemas, não corresponde à melhor

alternativa no sentido de especificar-se com maior precisão o seu comportamento dinâmico.

A Figura 4.1 ilustra o exemplo de um sistema produtivo formado por um magazine de entrada, outro de saída e uma máquina-ferramenta com flexibilidade operacional para processar três tipos de peças - peça A, peça B e peça C - assistida por um robô manipulador que executa as tarefas de carga e descarga dos materiais.

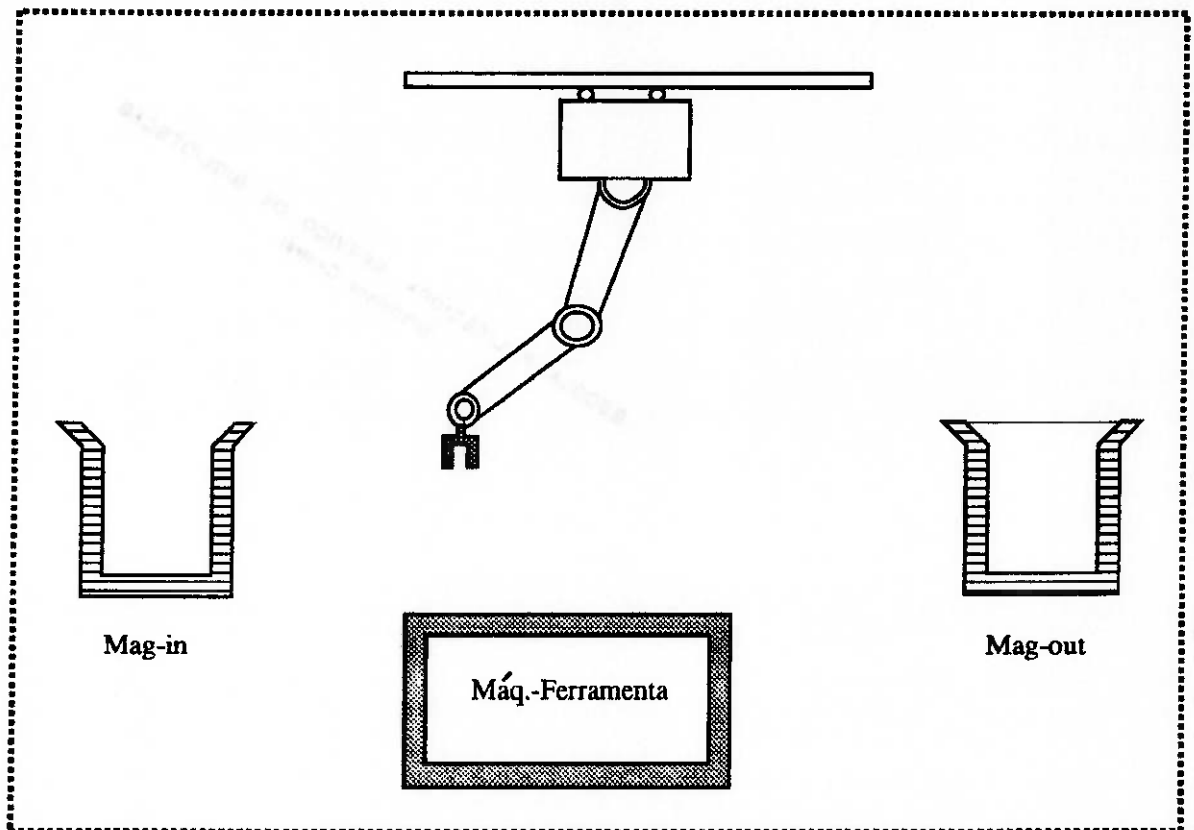


Fig. 4.1 Exemplo de sistema produtivo flexível.

Considere a situação em que se realiza a produção organizada em lotes individuais de peças. Neste caso, a modelagem deste sistema em MFG Funcional é bastante simples: basta definir o modelo do fluxo de materiais, representando as

atividades executadas pelo robô, relacionadas à carga e descarga das peças, e o processamento destas peças na máquina-ferramenta. Como a produção é programada em lotes, não há problemas relacionados ao controle do modo de operação da máquina em função da peça a ser processada. Este controle pode ser planejado previamente, de acordo com o lote que será processado, isto é, o sistema de controle objetiva manter o fluxo de peças na máquina, não sendo necessário controlar o tipo de peça que está sendo processada a cada instante. Corresponde à situação em que se realiza manufatura programada e não manufatura flexível.

A Figura 4.2 ilustra o modelo correspondente a este modo de operação do sistema.

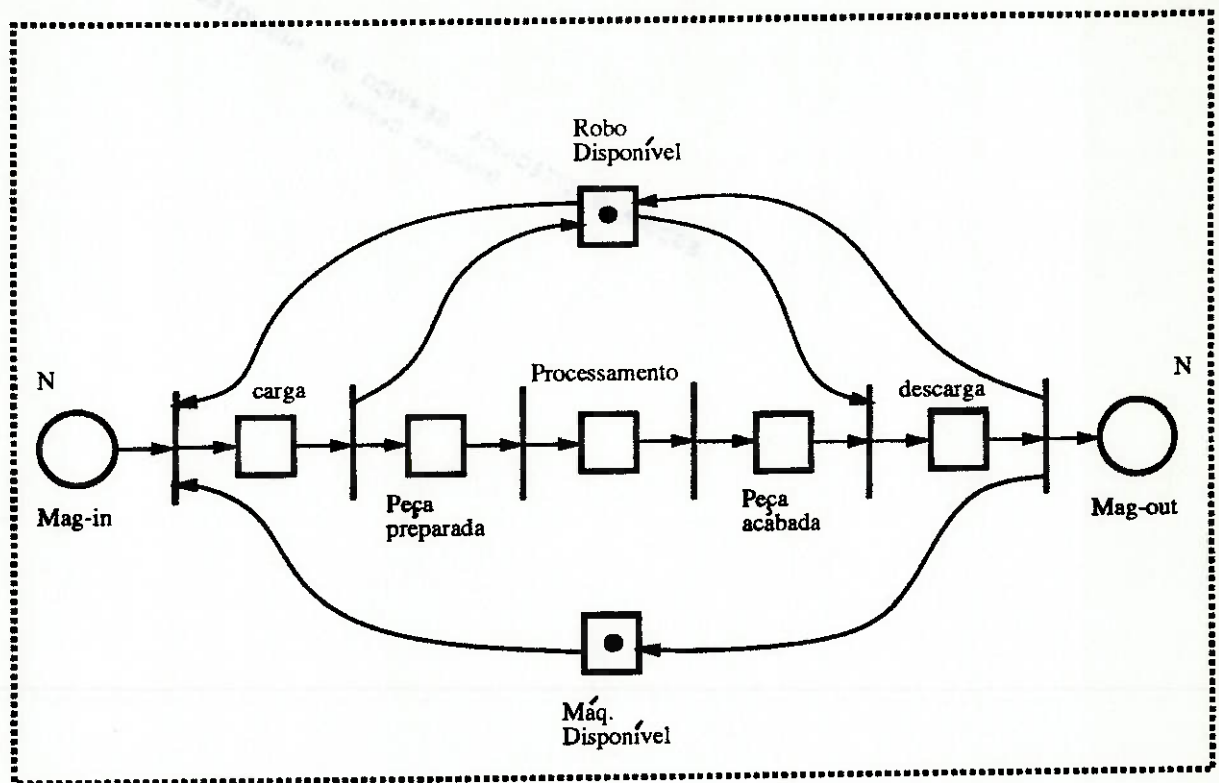


Fig. 4.2 Modelo MFG correspondente para produção em lotes individuais.

Entretanto, se alterarmos a programação para a produção de um "mix" de produtos, formado pelas três peças A, B e C, o processo de modelagem já não é

mais imediato, conforme descrito anteriormente. É necessário refinar as condições de carga, descarga e processamento das peças para representar a informação relativa ao tipo de produto que está sendo processado, no sentido de controlar adequadamente o modo de operação da máquina-ferramenta. A Fig. 4.3 representa um modelo adaptado para esta nova situação.

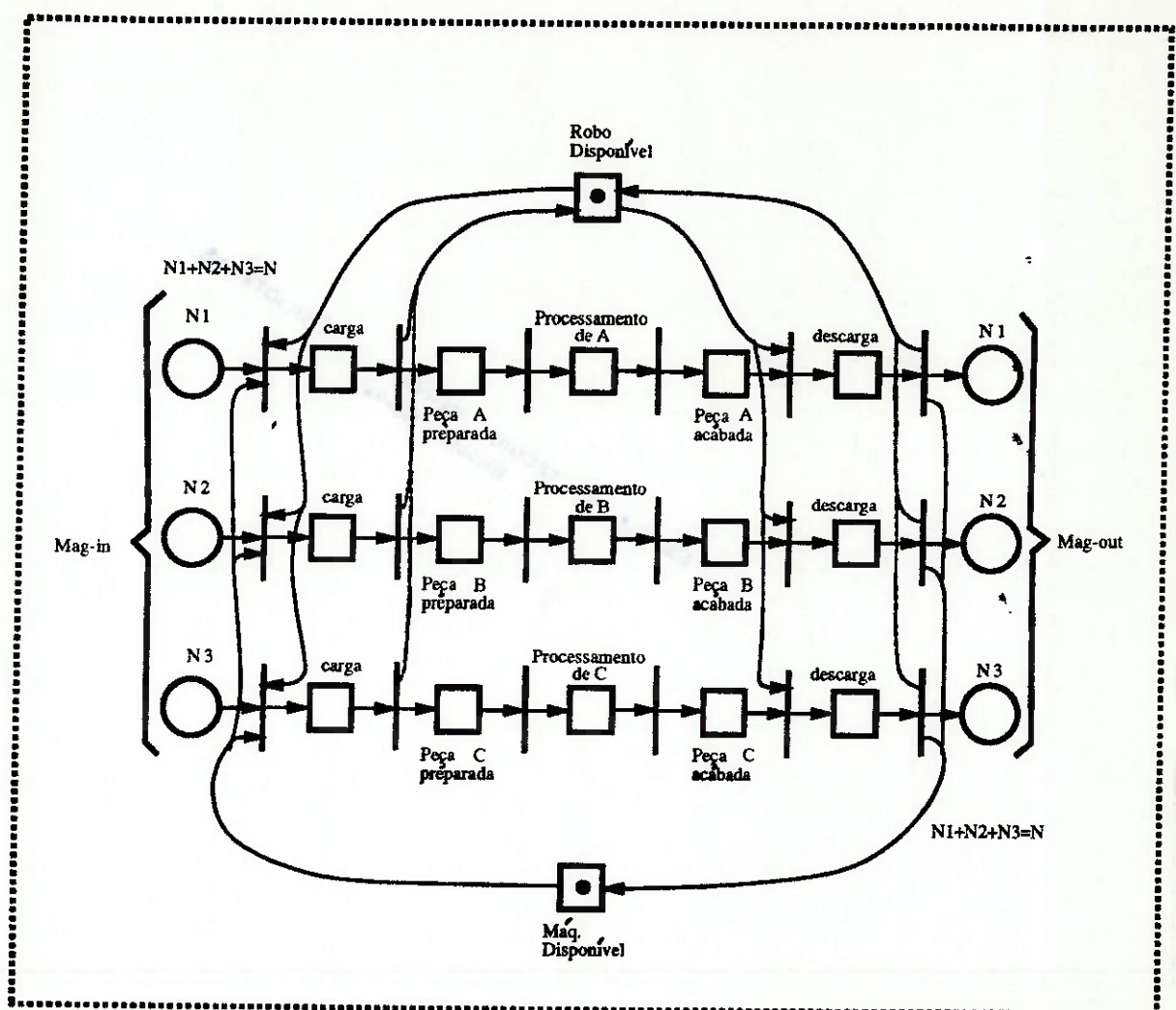


Fig.4.3 Modelo MFG correspondente ao processamento de um "mix" de produtos.

Avaliando-se os modelos apresentados, observa-se que a representação do comportamento dinâmico de um sistema pode ser complexa e esta complexidade depende do grau de flexibilidade e autonomia inerentes a este sistema. Neste

sentido, a complicação adicional do modelo está relacionada à representação da flexibilidade da máquina-ferramenta. A capacidade do sistema processar um "mix" de produtos implica na realização de um fluxo de peças distintas que pode ser modelado de forma mais eficiente se a ferramenta de modelagem manipular marcas individuais.

Portanto, o crescente grau de flexibilidade que caracteriza os sistemas produtivos de manufatura denota a necessidade de ferramentas para a modelagem também flexíveis, no sentido de serem capazes de capturar e tratar de forma eficiente o comportamento dinâmico destes sistemas. No caso do MFG Funcional, percebe-se, através dos exemplos apresentados, uma ausência de "*flexibilidade modeladora*" à ferramenta para representar eficientemente a flexibilidade operacional do sistema.

4.3 OS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DO E-MFG

O E-MFG amplia e simplifica o poder de representação das regras de controle do MFG funcional de duas maneiras. Primeiramente, inserindo atributos às marcas, a exemplo do que ocorre em Redes de Petri Colorida [VISHWANADHAM; NARAHARI, 1987]. A outra maneira consiste em associar regras de produção às transições, derivadas do ambiente de IA (Inteligência Artificial), para representar regras adicionais de controle [SAHRAOUI et al. (1987) e BAKO et al. (1990)].

Considerando-se os elementos estruturais básicos do MFG, houve a inserção de extensões apropriadas para elevar o nível de representação do grafo, a partir da realização de alterações fundamentais para adaptá-los e convertê-los em elementos estruturais do E-MFG. Neste sentido, o E-MFG é composto pelos seguintes "elementos estruturais básicos estendidos":

- as *transições* que indicam a ocorrência de eventos e admitem inscrições que representam regras adicionais restritivas para a evolução do estado do sistema;
- os "*boxes*" que indicam as pré e pós condições, mantendo a natureza *condição-evento* do sistema;
- as *marcas*, que indicam a manutenção de uma condição, podem ser individualizadas por atributos;
- os *arcos orientados* que estabelecem uma relação causal entre os eventos e as condições, podem conter inscrições variáveis que controlam a transmissão dos atributos das marcas individuais;
- as *portas* que habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos podem realizar este controle de maneira mais específica através de inscrições fixas relacionadas aos atributos agregados às marcas e;
- os *arcos de sinal de saída* podem transmitir informações aos dispositivos externos relativas ao estado dos atributos de uma determinada marca através da especificação de inscrições variáveis nestes arcos.

A partir dos conceitos apresentados, verifica-se que os elementos estruturais básicos do MFG apresentados na Fig. 3.1 , no Capítulo 3, correspondem ao caso particular em que não há especificação de atributos para representar marcas individuais e não há inscrições que representam regras adicionais associadas às transições e arcos. Apresenta-se, á seguir, os aspectos principais relacionados à:

- estrutura das marcas individuais,
- o conceito de marca individual composta,
- representação de inscrições nas transições e,
- modularização do E-MFG.

4.3.1 AS MARCAS INDIVIDUAIS

A concepção de marcas com atributos fundamenta-se na teoria de "Tagged MFG" [TAKAHASHI, K.; HASEGAWA, K., 1987], procurando-se manter as regras básicas de manipulação dos atributos.

As marcas no E-MFG são acompanhadas por um conjunto de atributos que lhes garantem individualidade. A estes atributos pode-se associar diversas informações referentes ao produto, ao processo e ao controle. Matematicamente pode-se definir os atributos a partir de um vetor de dimensão n e cada uma das componentes do vetor representa um atributo. Um atributo, por sua vez, pode ser representado por uma variável lógica ou inteira, dependendo de sua natureza. Se, por exemplo, os atributos forem representados por variáveis inteiras, pode-se considerar que o valor zero para um atributo significa a ausência do mesmo. Este conceito identifica-se com o conceito de rótulo utilizado no "Tagged MFG". A Figura 4.4 representa um exemplo de estrutura de marca individual.

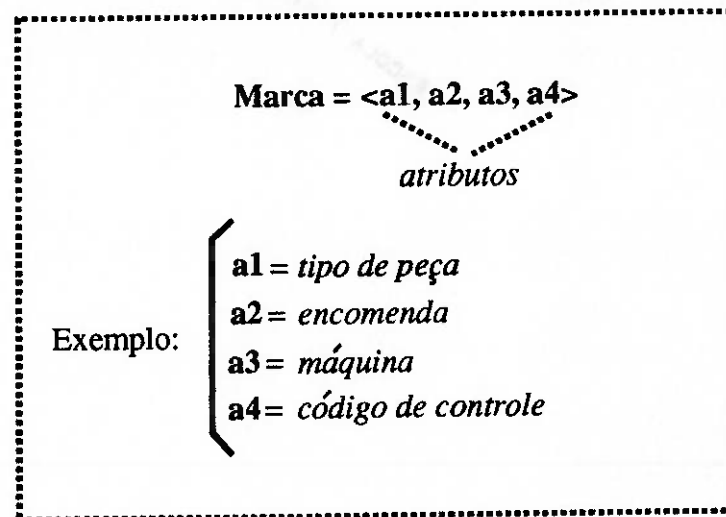


Fig. 4.4 Representação da estrutura de uma marca individual.

4.3.2 AS MARCAS COMPOSTAS

Denomina-se marca individual composta a marca que contém os atributos referentes a composição de várias marcas individuais simples. Esta composição baseia-se no estabelecimento de uma matriz de atributos em que cada linha corresponde ao vetor de atributos de uma marca individual simples. Neste sentido é necessário especificar na estrutura de uma marca um atributo especial, reservado para representar um código de controle de acesso às informações desta matriz. Se a modelagem basear-se em marcas com n atributos, uma alternativa consiste em reserva-se a n -ésima componente do vetor para a representação do código de controle. A Figura 4.5 representa um exemplo de agrupamento de três marcas individuais simples, incorporando vetores de quatro atributos - o quarto atributo representa o código de controle de composição - em que é gerada uma marca individual composta.

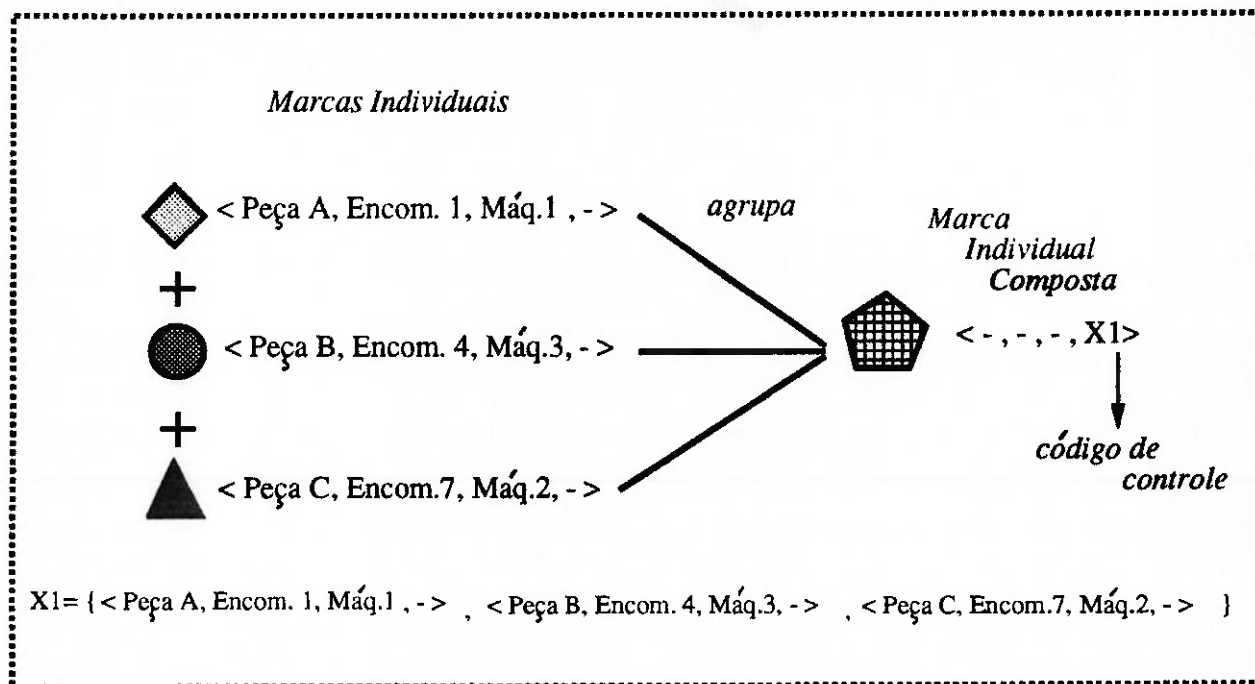


Fig. 4.5 Exemplo de marca individual composta.

O fato de reservar-se a última componente do vetor de atributos associado às marcas para representar as informações relativas à composição é apenas um detalhe de implementação, que pode ser alterado, de acordo com as conveniências do projetista do sistema baseado em E-MFG.

O processo de modelagem baseado no estabelecimento de marcas compostas é adequado quando se necessita armazenar a informação de quais itens são agrupados ("palletizados"), ou então, a origem dos itens desempacotados ("despalletizados") durante um determinado processo produtivo. Desta forma é possível recuperar e/ou armazenar estas informações sem perda de identidade.

É interessante observar que não existem restrições quanto aos atributos a serem integrados. Desta forma, é possível compôr-se várias marcas individuais compostas, ou ainda, compôr-se marcas individuais simples e compostas.

4.3.3 A MODULARIZAÇÃO DO E-MFG

No sentido de modularizar o MFG, foram propostos macro-elementos para simplificar a representação de diversos dispositivos presentes no ambiente de manufatura. Desta forma foi apresentado o F-MFG que agrega aos elementos estruturais básicos do MFG, os "boxes" funcionais tipo capacidade, agrupador e dispersor. Entretanto estes "boxes" manipulam marcas indistintas. Desta forma, um "box" agrupador ou dispersor, ou mesmo capacidade, controlam apenas a quantidade de peças. No caso de utilizar-se marcas individuais nestes "boxes", é possível controlar também a seqüência de entrada e saída de materiais e registrar o conteúdo das cargas. No caso do E-MFG, a necessidade de representar adequadamente funções de gerenciamento e os elementos que aparecem com maior freqüência no ambiente de manufatura motivaram a modularização em "boxes" funcionais, a exemplo do ocorrido em F-MFG.

4.3.3.1 "Box" Capacidade

Conforme apresentado anteriormente, o "box" capacidade modela magazines ou "buffers" para a estocagem temporária de itens, ou então, representa a disponibilidade de recursos para o controle das atividades. Como extensão advinda do E-MFG é possível especificar além do número máximo de marcas, a regra para retirada dos itens armazenados neste "box". Uma vez que as marcas são individuais, sua ordem de entrada (das marcas) é preservada permitindo a flexibilidade de selecionar a forma de retirada dos itens: FIFO ("First-In First-Out") ou FILO ("First-In Last-Out"). A Figura 4.6 representa o "box" capacidade.

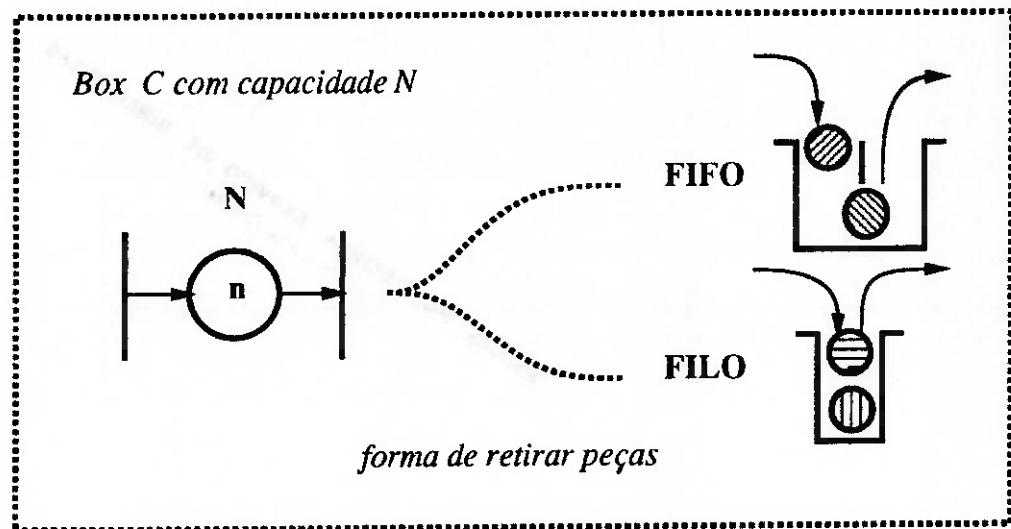


Fig. 4.6 O "box" capacidade FIFO ou FILO

É importante observar que neste caso não há a formação de uma marca individual composta.

4.3.3.2 "Box" Agrupador

Corresponde ao "box" agrupador visto no Capítulo anterior com a possibilidade de preservar as informações dos ítems que forem agrupados. Conforme ocorre o disparo da transição de entrada, as marcas são introduzidas uma por uma, armazenando-se nesta ordem os atributos a elas associados. Após o recebimento de todas as marcas na entrada, estabelece-se uma única marca composta, disponível assim que a transição de saída é disparada. Assim que a transição de saída dispara e a marca composta desaparece, todas as marcas contidas no "box" também desaparecem.

O código de controle relativo à composição é gerado internamente e associado à um dos atributos da marca, baseado na especificação do projetista. A Figura 4.7 representa um "box" agrupador representando uma composição de marcas.

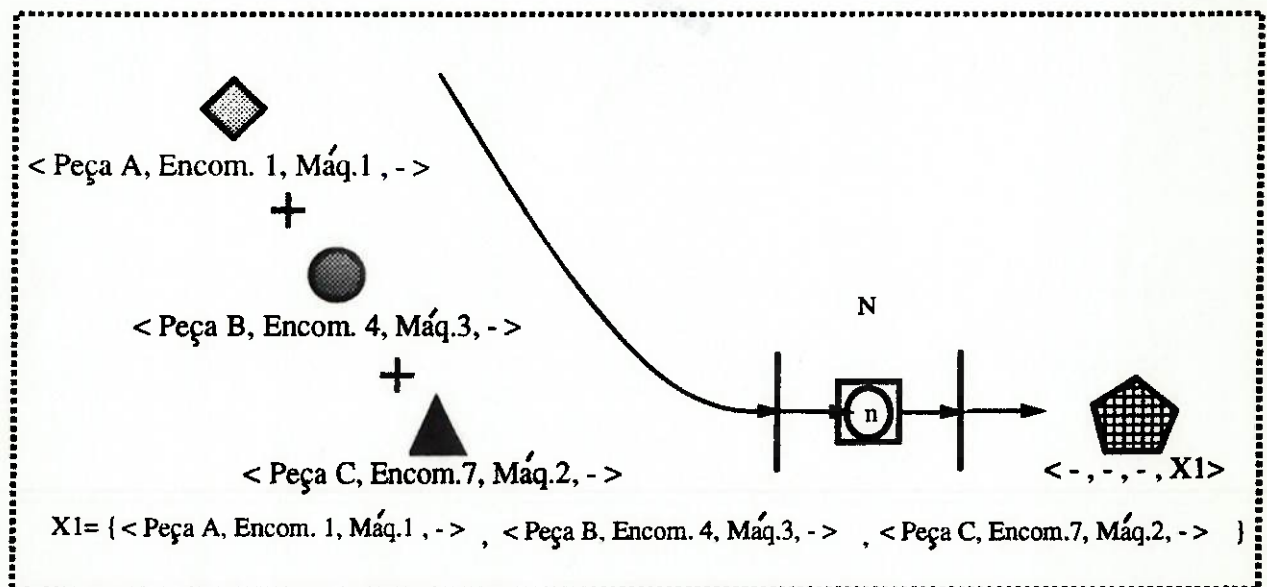


Fig. 4.7 Exemplo de modelagem com "box" agrupador

4.3.3 "Box" Dispensor

Recebe apenas uma marca individual composta na entrada. A partir do atributo relativo à composição, é possível acessar as informações de maneira a recuperar o conteúdo e a ordem de composição das marcas individuais primitivas. Na saída, obtêm-se as marcas ordenadamente, uma por uma, mantendo as especificações de seus atributos no estado anterior à composição. Existem duas maneiras de decompor-se a marca composta: FO ("First-Out") ou LO ("Last-Out"). Quando a marca introduzida é decomposta (para as marcas retornarem ao estado anterior à composição) e todas as marcas individuais dispersas deixam o "box", a marca da entrada desaparece e o "box" torna-se disponível para receber uma nova marca composta na entrada. A Figura 4.8 representa um exemplo de modelagem utilizando o "box" dispensador.

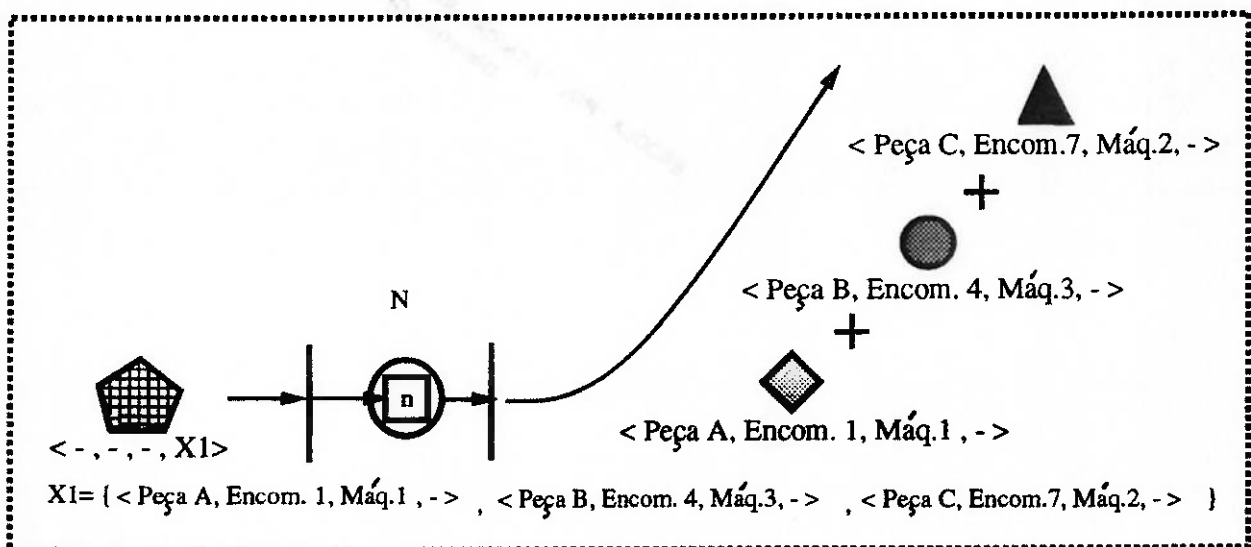


Fig. 4.8 Exemplo de modelagem com "box" dispensador

4.3.3.4 "Box" Controlador

A cada "box" controlador associa-se um conjunto de regras de controle para a atualização dos atributos das marcas. Estas regras são regras de produção do tipo *se...então* cujos fatos referem-se ao estado dos atributos e a atualização destes fatos também está associada à alteração do estado destes atributos. Estas regras são definidas durante o processo de modelagem e se constituem em uma forma de especificação de estratégias de controle para a supervisão das informações que acompanham as marcas. Maiores detalhes relacionados à funcionalidade deste "box" são explicitados adiante, quando for abordado o comportamento dinâmico da marcação de um grafo E-MFG.

4.3.3.5 "Box" Temporizador

É um "Box" de capacidade unitária que retém a marca em seu interior durante um intervalo de tempo que pode ser determinado a partir do estado de algum dos atributos, especificados para esta finalidade, agregados à presente marca individual. Este "box" é adequado para representar a flexibilidade operacional de máquinas-ferramenta em processar diversos tipos de peças, envolvendo intervalos de tempo de processamento diferentes.

4.4 COMPORTAMENTO DINÂMICO DA MARCAÇÃO

4.4.1 MANUTENÇÃO DOS ATRIBUTOS DAS MARCAS INDIVIDUAIS

Considerando o ambiente de manufatura flexível, o problema de controle dos atributos associados às marcas pode ser interpretado de duas maneiras. Ou podem ser atualizados através de *alterações condicionadas*, ou através de *filtragens seletivas*.

A *alteração condicionada* diz respeito à atualização dos atributos de uma marca individual mediante a alteração de seus atributos dependendo do estado atual da presente marca.

Esta tarefa é executada pelo "box" controlador. Este "box" controla os 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. As regras para atualização são especificadas por regras de produção do tipo "se...então". Os fatos constituem-se de proposições relacionadas com os estados dos atributos previamente selecionados. A Figura 4.9 ilustra um exemplo de "box" controlador alterando os atributos de uma marca.

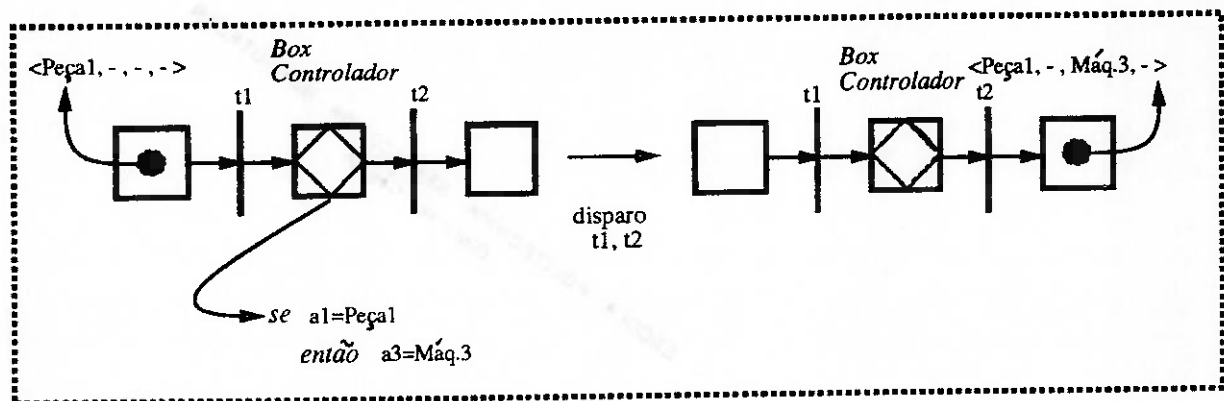


Fig. 4.9 Representação de um "box" controlador alterando os atributos de uma marca individual.

A modelagem baseada em "boxes" controladores vincula-se à representação dos resultados de um processamento ou inspeção realizado em um produto.

Outra forma de alterar-se os atributos de uma marca corresponde a *filtragem seletiva*. Neste caso, são especificados os campos que contém os atributos que devem ou não acompanhar a marca, após o disparo de uma transição. Esta especificação é realizada através de inscrições variáveis 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 atributos de uma determinada marca devem ou não ser transmitidos.

4.4.2 As Inscrições nas Transições

Para a inclusão de regras adicionais de disparo das transições, o desenvolvimento do trabalho baseia-se na teoria de "È-net" [Fuji Eletric (1989)]. Estas regras são inseridas no sentido de representar estratégias de controle de maneira clara e sem ambigüidade, com a possibilidade de manipular conhecimento declarativo em relação aos aspectos dinâmicos não representados eficientemente por elementos estruturais básicos do grafo MFG.

Estas regras adicionais agregadas às transições, que restringem o seu disparo, são especificadas por funções lógicas baseadas em cálculo proposicional. As proposições baseiam-se no estado dos atributos das marcas e são associadas através de conectivos apropriados para representar adequadamente as condições de controle para o disparo da transição [HILL; PETERSON (1968)]. A Figura 4.11 (secção 4.5) representa regras adicionais de controle associadas à transição t1.

4.4.3 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 "È-nets". Esta hierarquia corresponde a três níveis de decisão:

- Primeiro Nível: regras de restrições adicionais de disparo.
- Segundo Nível: regras de habilitação de disparo.
- Terceiro Nível: regras de realização de disparo.

O primeiro nível corresponde às regras de restrições adicionais de disparo que são funções lógicas agregadas às transições, 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, então não há regras adicionais que limitam o seu disparo. Uma transição que obedece 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:

- não existe "box" no lado de saída com marcas,
- não existe "box" no lado de entrada sem marcas ou com marcas com restrições,
- não existe porta habitadora interna e externa que esteja no estado de desabilitação e,
- não existe porta inibidora interna e externa que esteja no estado de inibição.¹

¹Estas condições relacionadas à classificação de uma transição em *transição habilitada* estabelece dois fatos importantes: o conceito de *marcas com restrições* e a verificação conjunta de portas inibidoras e habilitadoras.

O conceito de *marcas com restrições* está relacionado à manutenção das regras básicas de disparo herdadas do MFG. É interessante manter a estrutura básica destas regras pois estão vinculadas à natureza condição-evento apresentada pelo grafo, que é necessário preservar para que o E-MFG seja uma ferramenta adequada para a especificação do controle de sistemas produtivos. Neste contexto, é necessário tratar os boxes funcionais de forma adequada, considerando-os como macro-elementos. A pré-condição "há uma marca no box de entrada" nem sempre é suficiente pra garantir que esta marca está pronta para ser retirada deste box. Supõe-se que ao modelar-se uma atividade através de um box funcional, o início da atividade introduz uma marca no box que, por sua vez, pode permanecer aguardando a chegada de outras marcas - se for um box agrupador - ou então, aguardando um determinado período de tempo - se for um box temporizador. Após a eliminação destas restrições é que se libera a marca que entrou, ou então, surge uma nova marca com atributos alterados, correspondentes à atividade realizada. Portanto, uma marca com restrições é uma marca que entrou em um box funcional mas que ainda sofre *restrições funcionais* de acordo com a natureza deste box.

O outro fato que deve ser comentado refere-se ao teste das portas internas e externas. Consideramos que este teste pode ser realizado conjuntamente o que implica, em termos de "hardware", no estabelecimento de uma alocação de memória para a representação do estado dos elementos externos e que deve ser atualizada continuamente. Caso esta configuração não seja adequada para o "hardware" disponível, o projetista possui a alternativa de hierarquizar o conceito de *transição*

O terceiro e último nível corresponde às regras de realização de disparo. Estas regras correspondem à verificação das regras de arbitragem em situações que envolvem conflito e a verificação das regras de *filtragem seletiva* dos atributos, de acordo com as inscrições nos arcos orientados.

Uma *transição habilitada* é denominada *transição disparável* quando possui as possíveis situações de conflito arbitradas e as condições de filtragem seletiva averiguadas. Uma *transição disparável* dispara imediatamente, fazendo com que as marcas fluam pelo grafo.

É importante observar que a única forma do disparo de uma transição alterar os atributos de uma marca é através de *filtragem seletiva*. Os atributos não transmitidos são considerados ausentes e, se forem atributos inteiros, assumem o valor zero. Os atributos das marcas contidas nos "boxes" do lado de entrada são associados por intermédio de operações lógicas ou algébricas, dependendo da natureza previamente especificada para estes atributos (lógicos ou inteiros). A Figura 4.10 representa um exemplo de atualização dos atributos das marcas por *filtragem seletiva*, após o disparo de uma transição.

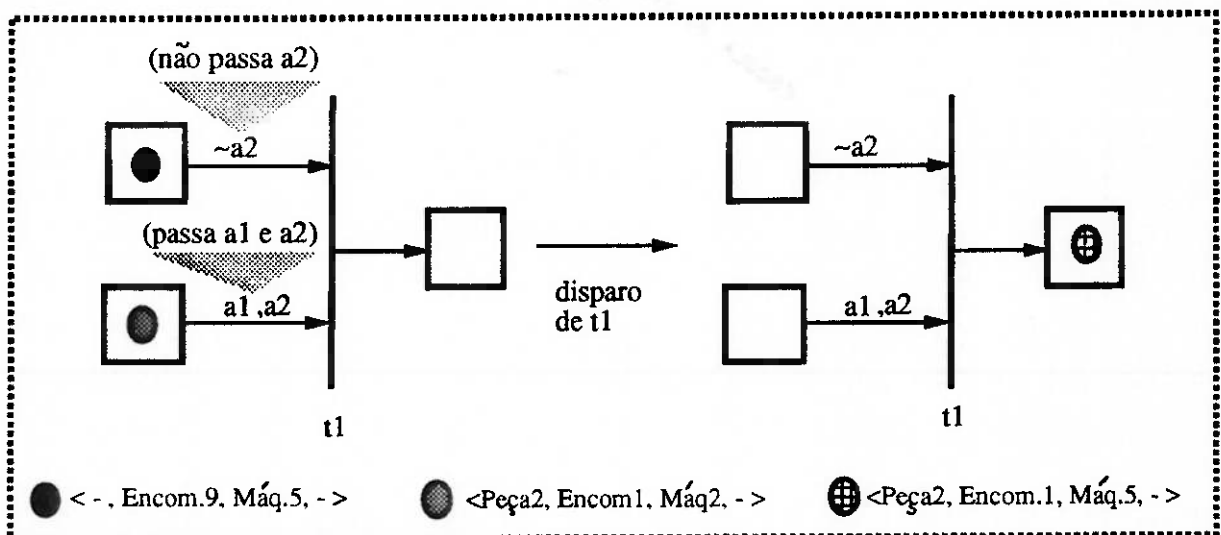


Fig. 4.10 Alteração dos atributos das marcas decorrentes do disparo.

habilitada em dois níveis: *transição internamente habilitada* (em relação às portas verifica apenas as internas) e *transição habilitada* (corresponde a uma *transição internamente habilitada* que verifica as condições das portas externas).

4.5 A FLEXIBILIDADE DO E-MFG

A Figura 4.11 ilustra um exemplo de modelagem de um sistema produtivo composto por um magazine de entrada, outro de saída e três máquinas-ferramentas, assistidas por um robô manipulador para a carga e descarga de materiais. Cada máquina possui flexibilidade para a troca automática de ferramentas, permitindo o processamento de três tipos de peças diferentes, sendo uma peça processada de cada vez. Portanto, neste sistema é possível processar um "mix" de até 9 produtos diferentes (3 em cada máquina). As marcas individuais que representam as peças possuem um vetor de quatro atributos associado, identificados por $\langle a_1, a_2, a_3, a_4 \rangle$. Estes atributos especificam as seguintes informações:

- a_1 corresponde ao tipo do produto,
- a_2 corresponde ao tipo da máquina,
- a_3 corresponde ao tipo da ferramenta e,
- a_4 corresponde ao código de controle para composição de marcas.

Observando-se o modelo, verifica-se que há inscrições na transição que representa o início da atividade de carga das peças a serem processadas. Estas inscrições representam regras adicionais de controle necessárias para que a condição *máquina disponível* esteja de acordo com o tipo de peça que chega para ser processada.

A partir deste exemplo apresentado, verifica-se a flexibilidade desta ferramenta em modelar SIMs. É possível manter a interpretação do modelo equivalente do sistema e ao mesmo tempo representar as informações e sinais de controle para a supervisão da planta. A Fig. 4.12 representa o modelo F-MFG do mesmo sistema. Comparando-se os dois modelos é possível concluir a respeito da contribuição desta ferramenta na especificação do controle de sistemas com alta grau de flexibilidade.

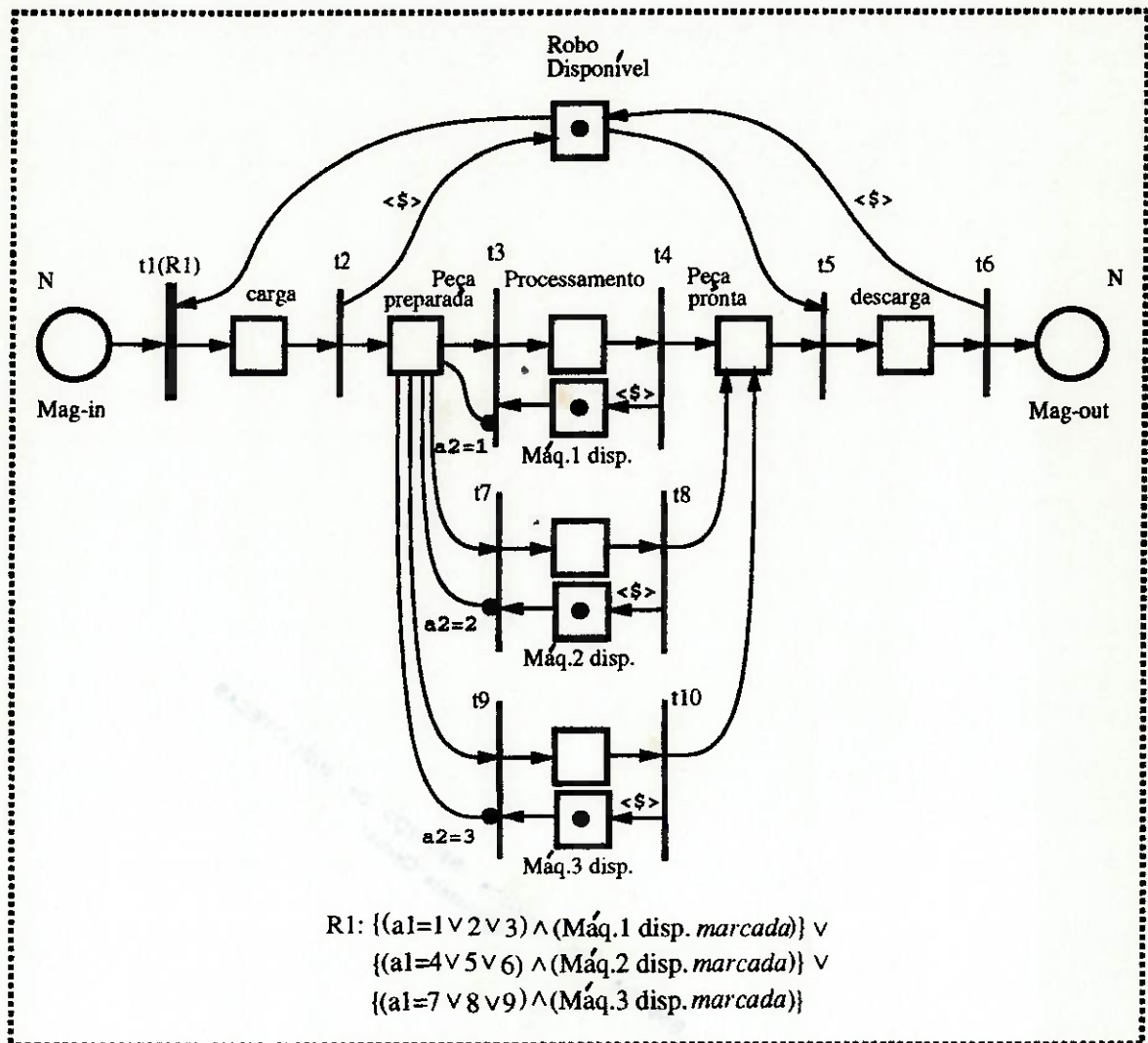


Fig. 4.11 Exemplo de modelagem baseada em E-MFG.

Apesar da capacidade e eficiência do E-MFG como ferramenta para a modelagem de sistemas produtivos flexíveis, há o problema de interpretação da estrutura das marcas em sistemas de grande porte, envolvendo uma variedade de atributos agregados às marcas individuais. Neste sentido, é proposta, no próximo capítulo, uma abordagem hierárquia baseada em PFS para a modelagem de sistemas em em E-MFG. O conceito de hierarquia é aplicado também á estrutura das marcas de forma a gerar uma interpretação para a estrutura de atributos das marcas.

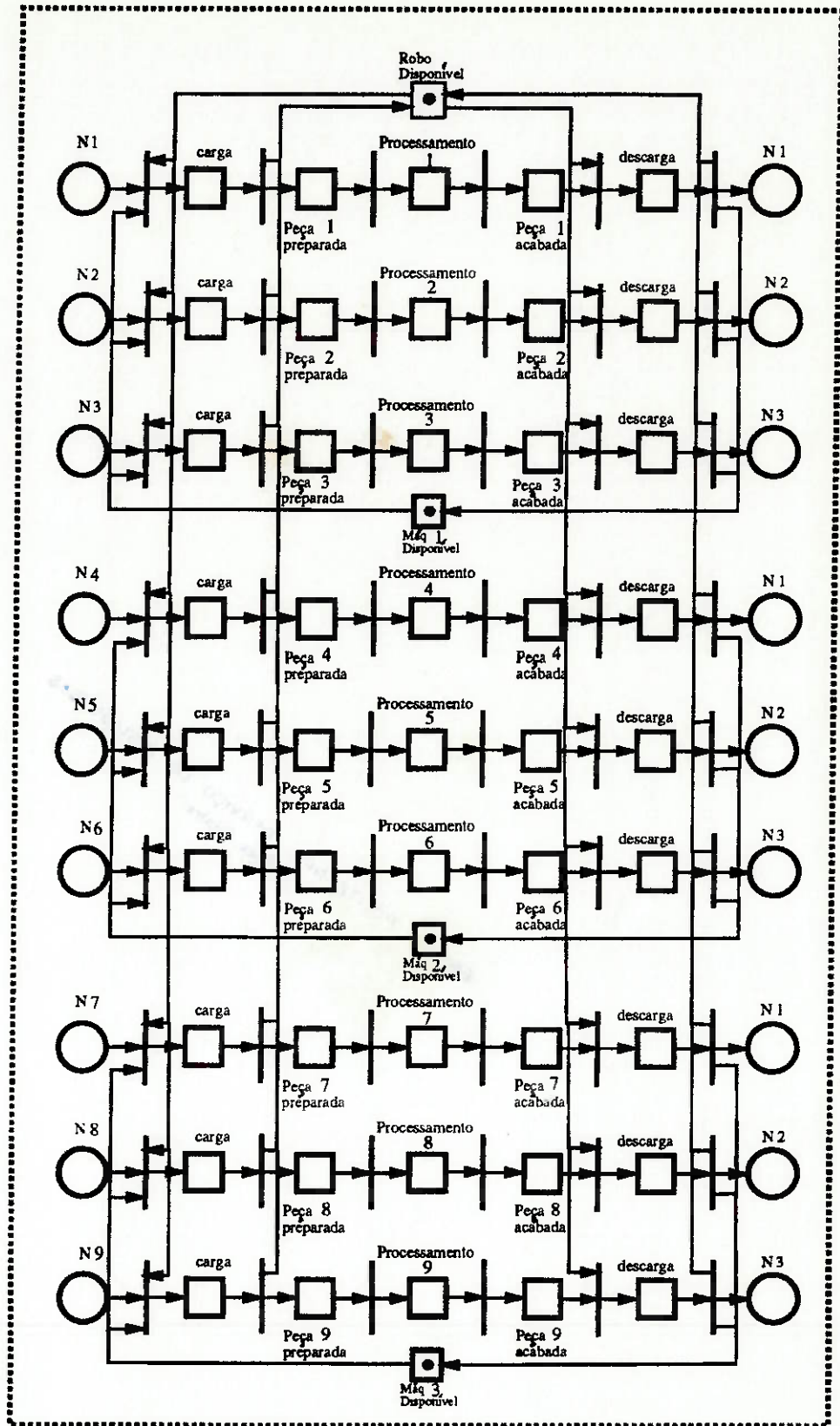


Fig. 4.12 Modelo F-MFG equivalente do sistema modelado na Fig. 4.11

Capítulo 5

ESPECIFICAÇÃO DO CONTROLE DE SISTEMAS INTEGRADOS DE MANUFATURA

5.1 INTRODUÇÃO

O conceito de controle em um ambiente de manufatura flexível está fortemente vinculado ao grau de automação pertinente a este ambiente. O controle automático de processos pode ser estendido para a situação em que o sistema produtivo é visto como um sistema dinâmico dirigido por eventos e, neste caso, a realização do controle baseia-se em aspectos decisórios a serem considerados em um ambiente que pode ser caracterizado por uma complexa heterogeneidade operacional, variando desde o controle local das máquinas e processos até o gerenciamento da produção.

Neste Capítulo aborda-se inicialmente as diferentes naturezas de controle automático presentes em um SIM. A seguir, apresenta-se as principais estruturas de controle de sistemas produtivos enfatizando as características fundamentais de cada uma delas. Para aprimorar o processo de modelagem e controle de sistemas

de manufatura é proposta a metodologia E-MFG/PFS, apresentando-se os aspectos básicos pertinentes à especificação do controle destes sistemas.

5.2 CONTROLE QUALITATIVO E CONTROLE QUANTITATIVO

Para o planejamento de sistemas produtivos que correspondam satisfatoriamente às necessidades de eficiência e flexibilidade é condição fundamental estabelecer um nível de automação das operações condizente com estas expectativas.

Neste sentido, como ferramenta básica para a realização da automação de um sistema dispõe-se das técnicas de Controle Automático, baseada em duas naturezas distintas de controle [IEE-Japan(1988)]:

- controle qualitativo e,
- controle quantitativo.

Genericamente, a estrutura fundamental de um sistema de controle automático podem ser representada pelo esquema ilustrado na Figura 5.1. O dispositivo de controle comunica-se com o objeto de controle, enviando ordens de comando de atuação e recebendo sinais de detecção que possibilitam a realização do controle. Desta forma, impõe-se o comportamento dinâmico desejado, de acordo com a especificação das ordens de comando externas. O objeto de controle representa a planta do sistema operativo que recebe as ordens de operação por intermédio dos atuadores do dispositivo de controle.

Dependendo da natureza do objeto de controle que constitui o sistema que se deseja controlar, é necessário executar-se controle de natureza qualitativa e/ou quantitativa.

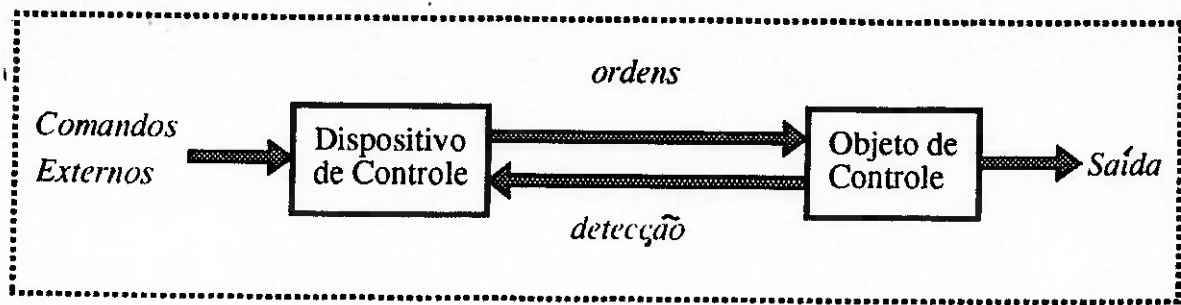


Fig. 5.1 Sistema de controle automático básico

Ao realizar-se controle quantitativo o objetivo é estabelecer uma comparação entre o valor de uma variável controlada e um valor de referência previamente especificado. As variáveis envolvidas nesta natureza de controle são contínuas e o conteúdo destas variáveis possui uma quantidade infinita de informações, isto é, são informações analógicas. Uma das formas exaustivamente utilizadas no controle quantitativo de sistemas é o Controle por Realimentação. Este tipo de controle caracteriza-se pela aplicação dos conceitos de realimentação negativa e malha fechada, conforme ilustra a Figura 5.2. Esta técnica de controle objetiva vincular o valor da variável de saída controlada a um valor de referência pré-estabelecido.

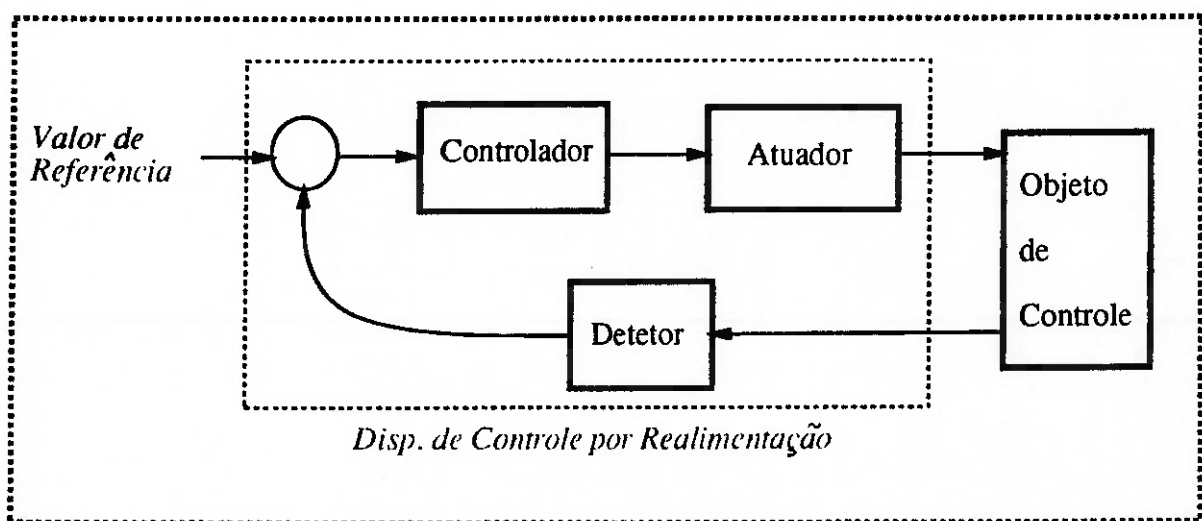


Fig. 5.2 Controle por Realimentação

O controle quantitativo é aplicado a SVCs, uma vez que manipula informações contínuas. Portanto, uma variedade de técnicas baseadas em funções de transferência e equações de estado já foram desenvolvidas e largamente apresentadas na bibliografia.

Por sua vez, considerando-se o caso do objeto de controle constituir-se de um sistema que pertence à classe dos SEDs, a realização do controle deste sistema implica na utilização de técnicas de controle qualitativo baseadas no estabelecimento de regras para a evolução de seu estado a partir da manipulação de informações discretas. Neste caso, o conteúdo dos comandos de controle é caracterizado por um número finito de informações (na maioria das vezes informações digitais binárias) cuja interpretação está relacionada ao conceito de estado de um sistema dirigido por eventos. Da mesma forma, a variável de saída controlada não é manipulada diretamente como valor numérico real, mas sim transformada em um estado lógico equivalente, a partir da atuação de conversores de estado, caracterizando-se assim um sistema de controle qualitativo de malha fechada. A Figura 5.3 ilustra os blocos fundamentais de um sistema dessa natureza.

Para a realização do controle qualitativo utiliza-se com muita frequência as técnicas de Controle Seqüencial. De acordo com MIYAGI & FURUKAWA (1988), este tipo de controle pode ser definido como "controle onde cada etapa das ações de controle são executadas ou em uma seqüência pré-fixada, ou imediatamente em resposta à condições previamente estabelecidas".

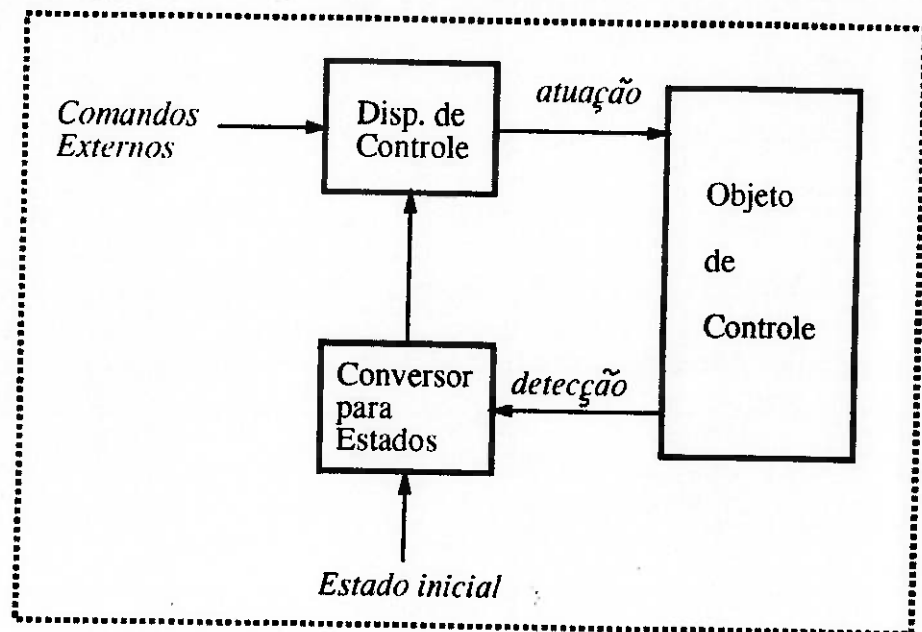


Fig. 5.3 Controle qualitativo de malha fechada

Baseado nesta abordagem, considera-se que os vários dispositivos independentes que compõem o objeto de controle possuem um número finito de estados do tipo abrir ou fechar uma válvula, avançar ou recuar uma esteira, ligar ou desligar um motor, e assim por diante.

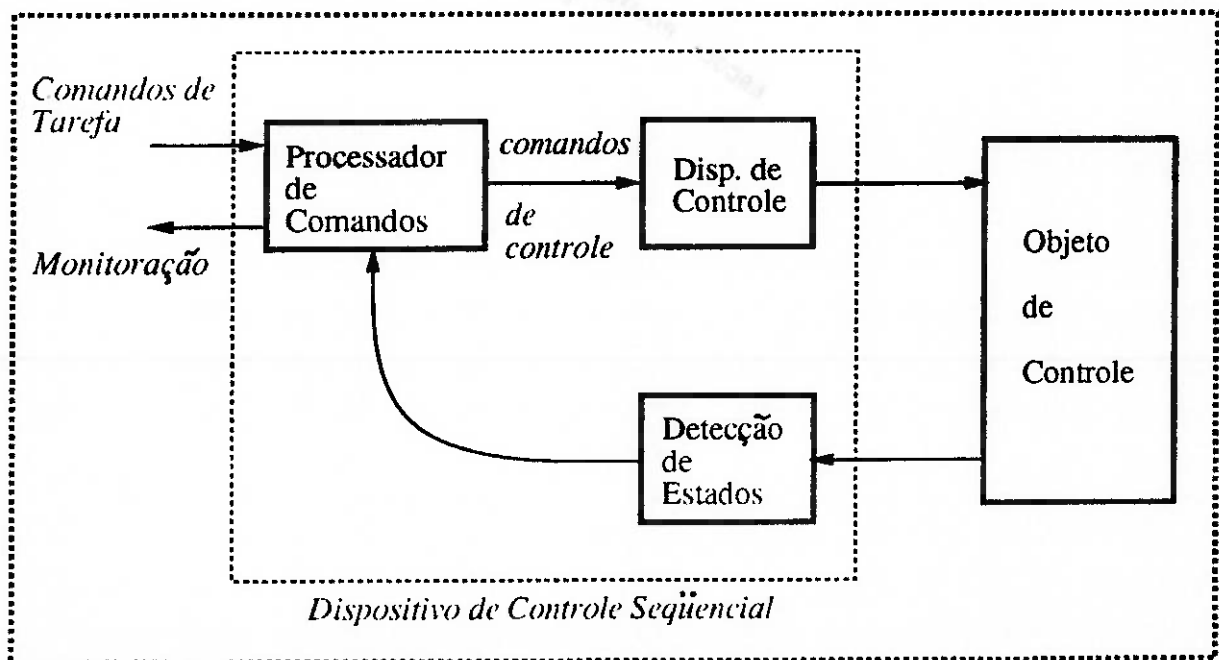


Fig. 5.4 Sistema de controle seqüencial básico

A Figura 5.4 ilustra a estrutura básica de um sistema de controle seqüencial. O processador de comandos gera a seqüência de comandos adequada para a realização das operações correspondentes, de acordo com as ordens de comando de tarefa externas.

No caso dos SIMs observa-se a presença de um complexo conjunto de informações qualitativas e quantitativas em virtude da coexistência das duas naturezas de controle ilustradas nas Figuras 5.2 e 5.4 [SANTOS F^o & MIYAGI (1991)]:

- A nível de controle interno das máquinas, dispositivos e processos envolvendo variáveis contínuas (controle de velocidade de um motor, por exemplo) realiza-se o controle quantitativo, por Realimentação e, por sua vez;
- A nível de funções associadas ao gerenciamento da produção e funções relacionadas ao controle direto das operações em chão de fábrica realiza-se o controle quantitativo relacionado à manutenção do fluxo de materiais e informações nestes sistemas.

Neste contexto, observa-se a necessidade de estruturas de controle abstraídas em vários níveis que podem ser tratados como uma combinação de controles seqüenciais. Portanto, independente da complexidade, se o objetivo for realizar o controle de sistemas dirigidos por eventos formados por dispositivos independentes que podem assumir um número finito de estados, as técnicas de controle seqüencial constituem a teoria elementar para auxiliar a especificação do controle.

5.3 ESTRUTURA DO SISTEMA DE CONTROLE

Segundo DESCHANEL apud KÜNZLE (1990) há três formas distintas para a realização do processo de decisão no controle de sistemas de manufatura:

- através de uma estrutura centralizada,
- através de uma estrutura distribuída ou,
- através de uma estrutura hierarquizada.

A estrutura centralizada supõe a existência de um coordenador central para o tratamento das decisões envolvendo todos os elementos do sistema. É necessário a manutenção das informações de controle pertinentes a cada dispositivo independente e pertinentes à coordenação destes elementos. Portanto, para sistemas de grande porte, evidencia-se o surgimento de um problema principal básico: a dimensão do volume de informações a ser tratado a cada período de atualização das ordens de controle. Se a quantidade de informações a serem processadas for bastante elevada, pode haver problemas de capacidade de atualização destas informações em tempo real por parte do sistema de controle. A Figura 5.5 ilustra a estrutura básica de um sistema de controle centralizado.

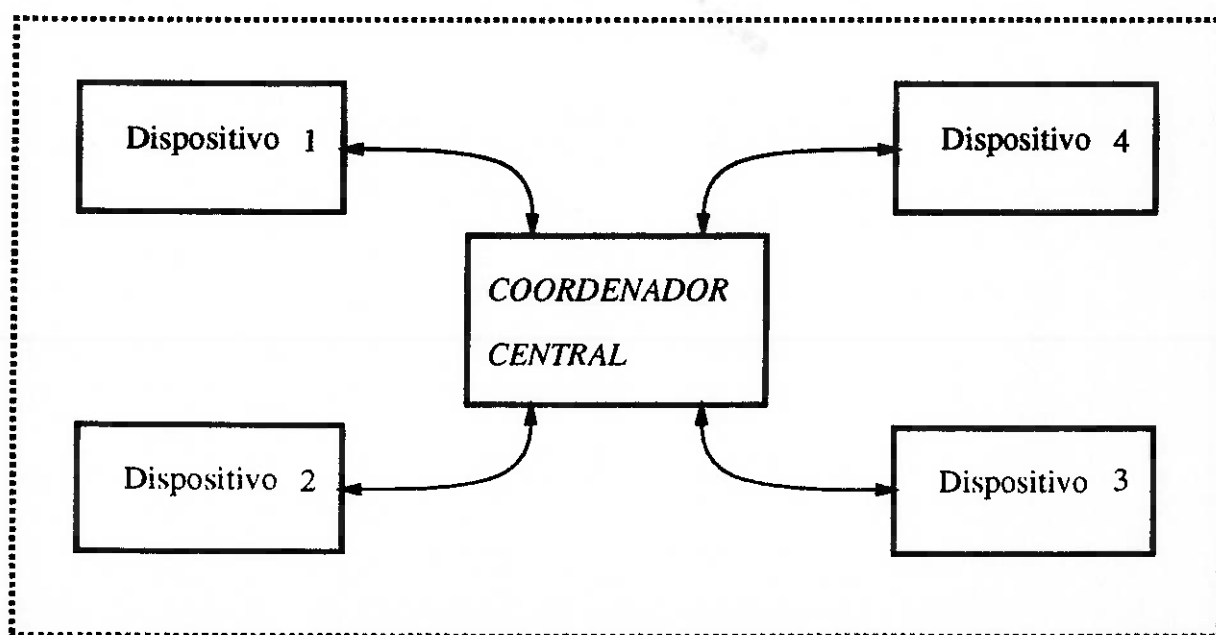


Fig. 5.5 A estrutura de um sistema de controle centralizado

Em contrapartida, a estrutura distribuída estabelece um único nível de controle para todos os dispositivos independentes do sistema. Cada um destes elementos é constituído por um centro de decisão independente dos outros e as decisões tomadas referem-se a si próprios e à coordenação deles com os outros elementos. A estrutura básica de um sistema distribuído é representada na Figura 5.6.

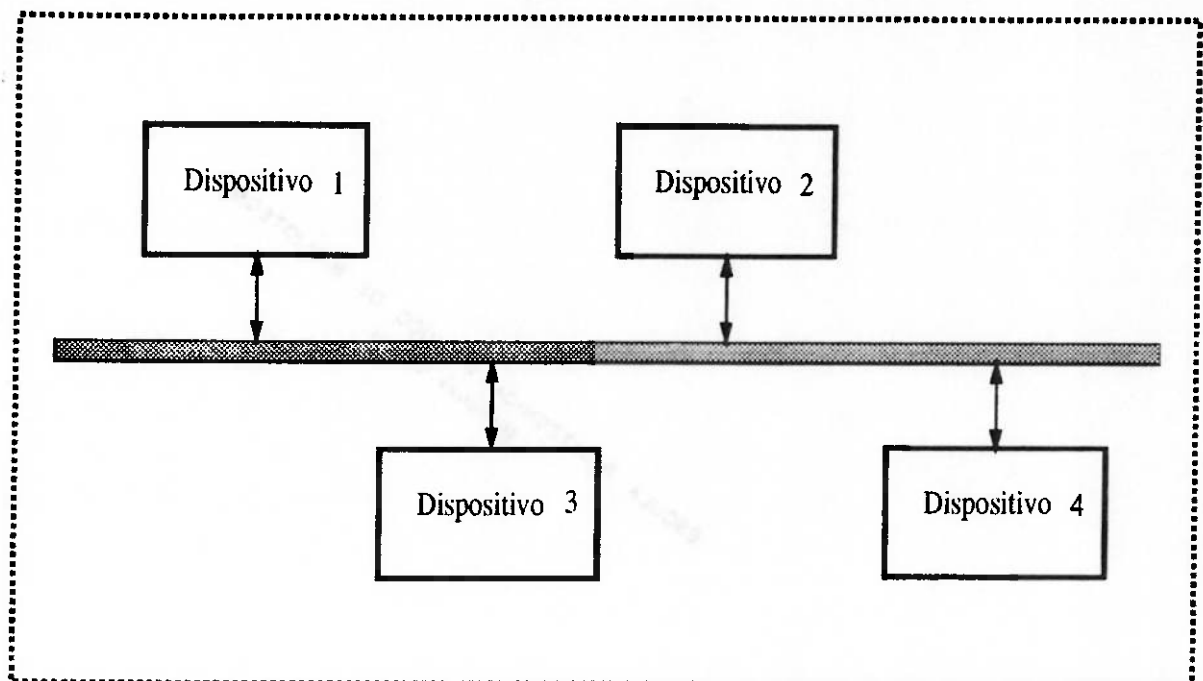


Fig. 5.6 A estrutura de um sistema de controle distribuído

Por sua vez, um sistema de controle de estrutura hierárquica caracteriza-se pelo refinamento sucessivo dos centros de decisão em unidades cada vez mais específicas. Neste contexto, obtêm-se um sistema de centros de decisão distribuídos em vários níveis em que cada elemento toma as decisões relativas a si próprio e as de coordenação dos elementos subordinados, correspondentes ao nível imediatamente inferior. Esta estrutura simplifica o processo de decisão, uma vez que o volume de informações tratado limita-se ao intercâmbio entre um

elemento e seus subordinados de nível inferior. A Figura 5.7 representa um sistema de controle de estrutura hierárquica básico.

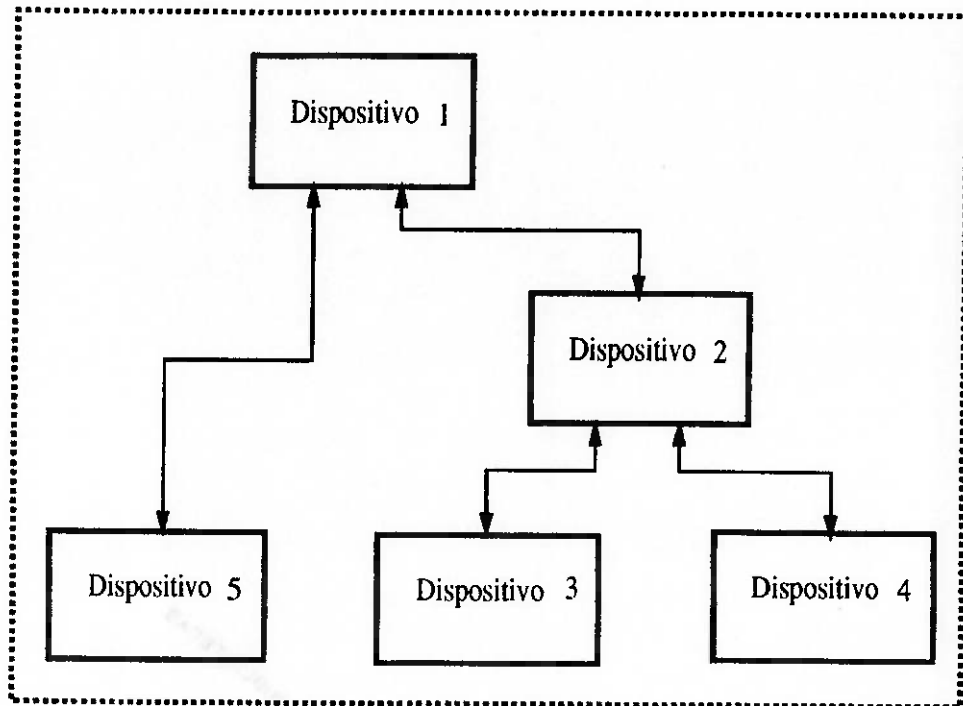


Fig. 5.7 A estrutura de um sistema de controle hierárquico

É importante observar que o tempo atribuído para o tratamento de uma decisão em uma estrutura hierárquica depende do nível hierárquico em que o elemento encontra-se localizado.

A partir dos conceitos apresentados e utilizando uma abordagem baseada em sistemas antropocêntricos, a alternativa de adotar-se uma estrutura de controle distribuído hierarquizada parece adequada no sentido de contribuir para o desenvolvimento de unidades de produção autônomas e inteligentes (permite o desenvolvimento estruturado de complexas células flexíveis, organizadas em vários níveis conceituais de abstração) e, ao mesmo tempo, satisfazer as necessidades atuais de manipular-se uma variedade de decisões a serem tomadas em tempo real envolvendo um complexo tratamento de informações. Neste sentido, é proposta, a

seguir, uma decomposição hierárquica para o tratamento da complexidade do problema de controle de um SIM.

5.4 A HIERARQUIA DE CONTROLE DE SIMs

A conceituação de Sistemas Integrados de Manufatura em ambientes de automação industrial, apresentada no Capítulo 2, sugere uma abordagem hierárquica para a interpretação da estrutura funcional de sistemas produtivos desta natureza.

Por sua vez, o conceito de hierarquia estende-se ao sistema de controle que realiza o gerenciamento dos fluxos de materiais e informações presentes em um SIM. Neste contexto, realizar o controle desses fluxos é um importante desafio da teoria de controle: quanto maior o grau de autonomia dos dispositivos que constituem um SIM, mais qualitativo se torna o controle automático destes elementos, no sentido de o objetivo principal passar a ser a supervisão e, posteriormente, o planejamento do controle destes fluxos, podendo ser interpretado como uma combinação de controles seqüenciais de crescente complexidade.

Portanto, é necessário uma decomposição para tratar a complexidade de SIMs e uma das alternativas é basear-se em uma hierarquia de decisão e de controle. Em VALETTE (1986), VALETTE et.al. (1988), VALETTE & SILVA (1990) e KÜNZLE (1990) são apresentadas várias propostas de decomposição hierárquica que foram utilizadas como base para a proposta de uma hierarquia para a realização do controle e tomada de decisões constituída por quatro níveis fundamentais:

- Nível de controle local das máquinas e atuadores.
- Nível de coordenação dos subsistemas.
- Nível de coordenação global.
- Nível de planejamento.

O nível de controle local das máquinas e atuadores corresponde ao nível de controle relacionado aos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) - para o controle de atuadores e intervenção direta no controle contínuo de processos - e aos dispositivos especiais que constituem unidades de controle locais específicas para o controle das máquinas-ferramenta, robôs, fixadores, esteiras e demais elementos físicos pertinentes ao processo produtivo.

O nível de coordenação dos subsistemas estabelece o controle "on-line" baseado em controladores lógicos agregados às células e linhas flexíveis de manufatura. As funções destes controladores em um sistema produtivo dirigido por eventos referem-se à sincronização das operações e funcionamento das várias máquinas e dispositivos e controle do fluxo de materiais nestes ambientes. Neste sentido, é necessário coordenar os equipamentos e agregar os dados relativos ao processo e ao produto e, escalonar e efetuar o roteamento e monitoração da produção em estações organizadas em células ou linhas flexíveis de manufatura.

O nível superior de coordenação global tem como objetivo a definição dos tipos e quantidades de produtos a serem manufaturados dentro de um determinado intervalo de tempo, escalonando os tipos e quantidades de peças que cada unidade de produção específica deve concluir. Neste sentido, as funções básicas pertinentes a este nível de controle correspondem ao domínio de processamento de dados, realizando-se:

- a atualização do banco de dados referente ao estado do sistema produtivo, após a ocorrência de cada evento;
- a tomada de decisões concernentes ao lançamento de novas operações e sua adequação à manutenção do escalonamento de atividades programadas sobre um determinado horizonte de tempo e;
- a monitoração do estado global da fábrica de forma a detectar discrepâncias em relação ao escalonamento de atividades programadas e falhas nos dispositivos físicos.

O nível de planejamento corresponde à estipulação do escalonamento das atividades programadas para um determinado intervalo de tempo. Neste nível planeja-se a alocação das máquinas para a execução das várias operações necessárias para assegurar o cumprimento das metas de produção desejadas.

A Figura 5.8 ilustra a hierarquia e distribuição do controle em um sistema de manufatura. Nesta estrutura os diversos dispositivos de controle são interligados em rede através de sistemas de comunicação de alta velocidade.

5.5 MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

Os sistemas de manufatura podem ser representados por dois subsistemas fundamentais interconectados e que se comunicam cooperativamente. Estes subsistemas representam a parte operativa e a parte de controle, respectivamente, de acordo com a Figura 5.9.

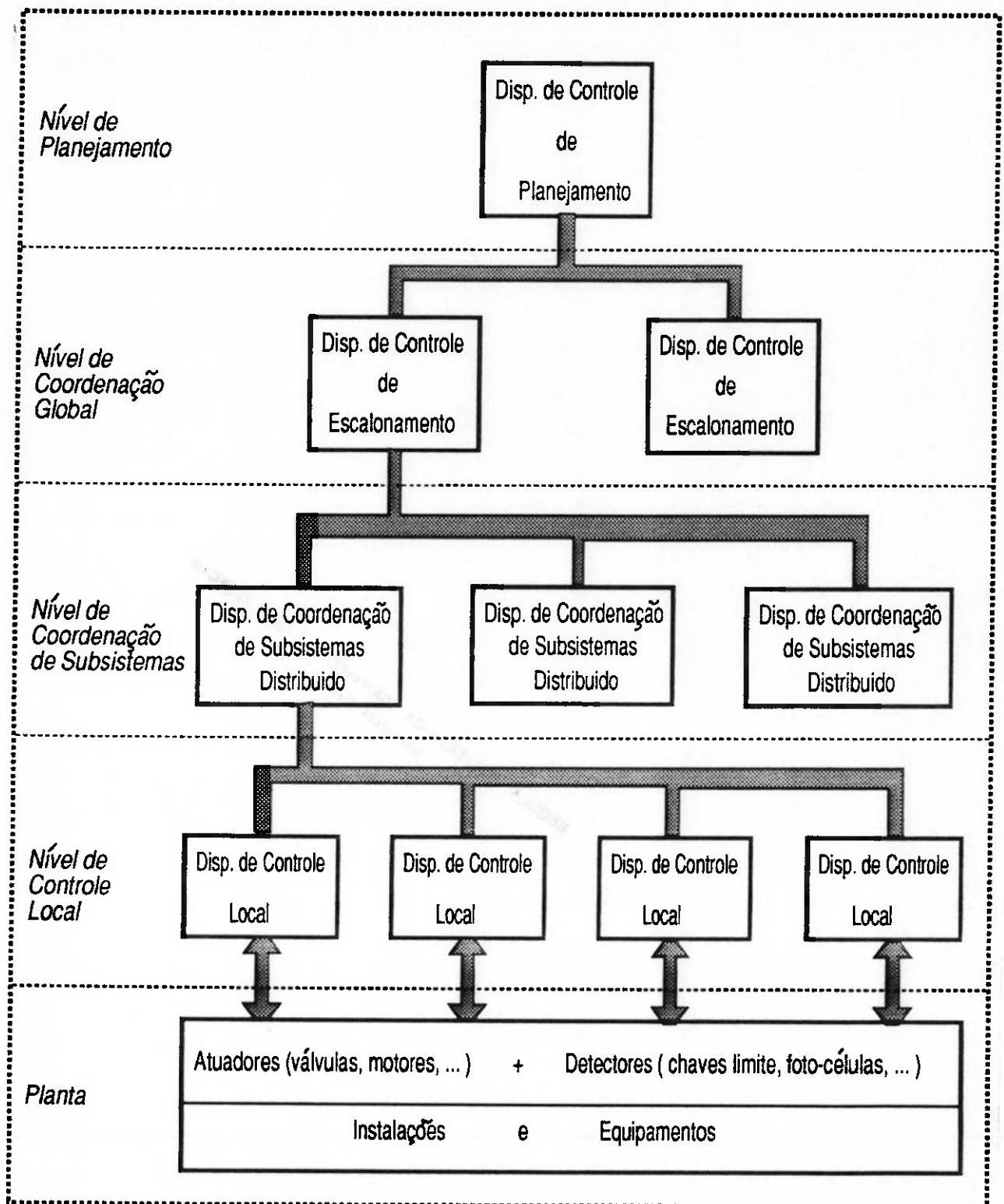


Fig. 5.8 Estrutura de um sistema de controle hierárquico e distribuído.

Esta decomposição dos sistemas consiste em estabelecer uma distinção entre um subsistema de execução - parte operativa - e um subsistema de coordenação - parte de controle. A parte operativa envia, para a parte de controle,

informações sobre o seu estado e, a parte de controle, de acordo com estas informações, envia ordens para a parte operativa.

A descrição de um sistema por partes simplifica o processo de modelagem, no sentido de obter-se um modelo global do sistema controlado.

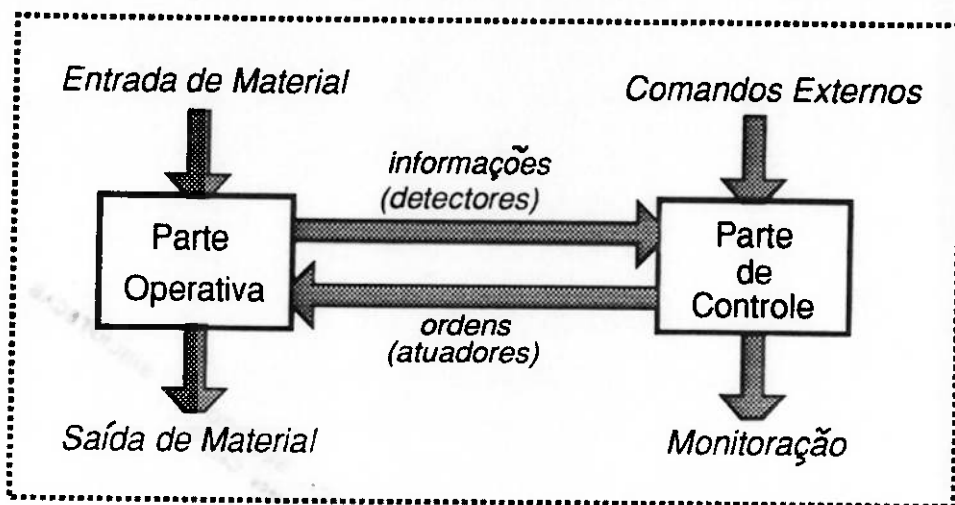


Fig. 5.9 Decomposição da descrição de um sistema em parte operativa e parte de controle

Em um SIM, a parte operativa relaciona-se ao modelo do objeto de controle que representa a planta do sistema produtivo. Admitindo-se a hipótese de que o controle qualitativo de um SIM pode ser tratado como uma combinação de controles seqüenciais, os dispositivos que compõem estes sistemas podem ser descritos como elementos que apresentam um número limitado de estados discretos alcançáveis. Desta forma, controlar o sistema significa sincronizar uma variedade de elementos, que representam os dispositivos físicos, para executarem um determinado programa de atividades.

Para a modelagem destes dispositivos físicos é possível utilizar o E-MFG. A utilização desta técnica de modelagem permite a representação explícita dos

estados alcançáveis por cada dispositivo e permite também, através de seus elementos estruturais - portas externas e arcos de sinal de saída - uma eficiente troca de sinais entre o controlador e o objeto de controle. O controlador envia informações aos dispositivos, a partir de arcos de sinal de saída, no sentido de habilitar a realização de uma determinada tarefa e, em contra-partida, recebe informações de confirmação do término da tarefa, a partir de portas externas associadas aos dispositivos, liberando, desta forma, o controlador para a realização da etapa seguinte de controle.

Por sua vez, a parte de controle representa o controlador que pode ser modelado de forma consistente, aplicando-se a técnica E-MFG. As condições para a evolução do sistema, de acordo com as atividades a serem realizadas, envolvem a sincronização e seqüenciamento das operações a serem realizadas pelos diversos dispositivos que constituem o sistema físico. Neste sentido, a aplicação do E-MFG baseia-se na representação do fluxo de materiais e informações decorrente da realização das atividades pertinentes aos processos produtivos executados no sistema. Desta forma, realiza-se a integração dos diversos dispositivos envolvidos nos processos produtivos a partir do controle do fluxo de itens característico.

Para direcionar o processo de modelagem, no sentido de aprimorar a forma de especificação do controle, é necessário adotar-se uma metodologia que permita o desenvolvimento estrutura de modelos e que proporcione uma interpretação indispensável nas situações que envolvem complexos modelos de sistemas de grande porte. Neste sentido, nas próximas secções, propõem-se uma interpretação para os atributos que constituem o vetor agregado às marcas individuais e uma metodologia para a especificação do controle de forma estruturada, que garanta uma interpretação para o modelo E-MFG detalhado correspondente ao nível de coordenação dos subsistemas.

A Figura 5.10 ilustra um exemplo de modelagem de um sistema de controle baseada em E-MFG, explicitando as trocas de informações entre a parte operativa (objeto de controle) e a parte de controle.

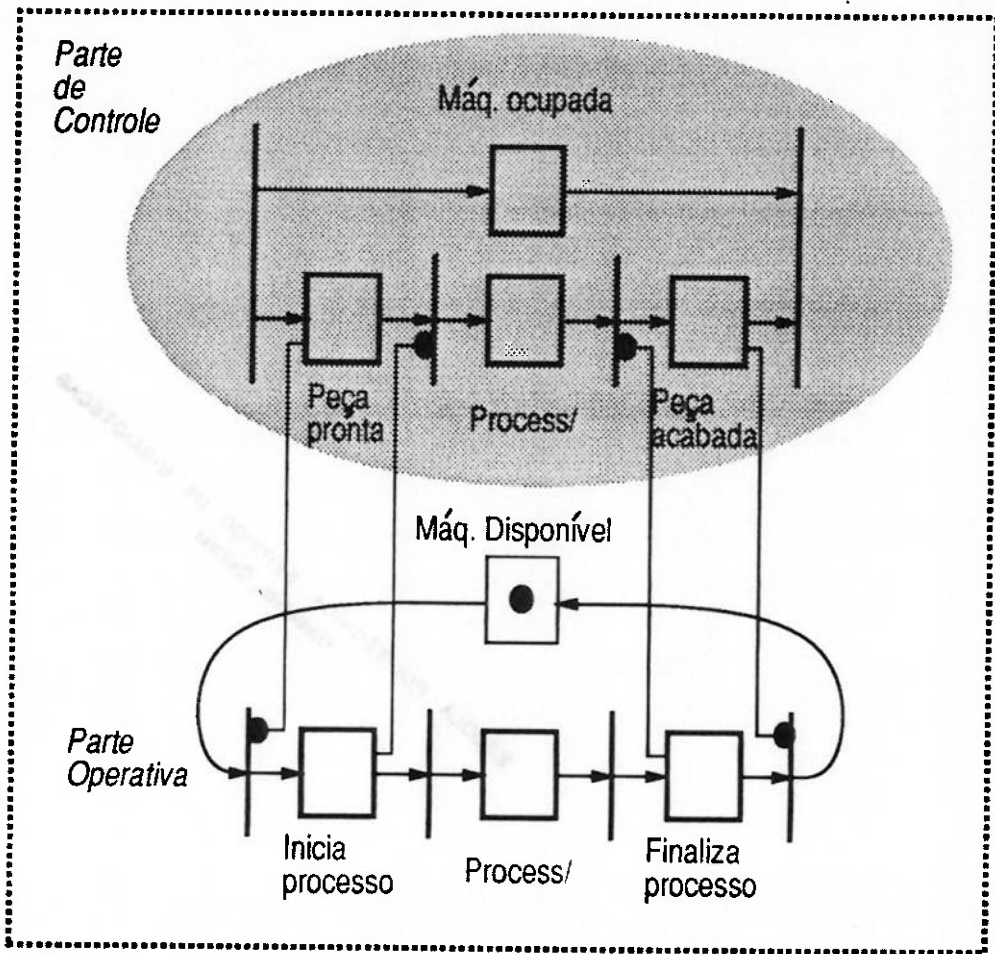


Fig. 5.10 Exemplo de descrição das partes operativa e de controle em E-MFG

5.6 UMA METODOLOGIA PARA ESPECIFICAÇÃO DO CONTROLE

5.6.1 O E-MFG E A MODELAGEM DE SIMs

Em SVC o modelo da parte de controle é realizado a partir de formulações matemáticas adequadas capazes de descreverem de forma consistente e sucinta as características de controle necessárias para garantir o comportamento dinâmico desejado para o sistema.

No caso de SIM - sistemas dirigidos por eventos - a especificação da parte de controle pode ser realizada, basicamente, de duas formas distintas:

- a partir das funções lógicas que descrevam de forma consistente as características de controle, ou;
- a partir de técnicas de modelagem formais e sofisticadas que incorporem em sua estrutura as características de SIM.

A primeira alternativa consiste em aplicar uma metodologia para SIM semelhante à aplicada para SVC. Define-se expressões lógicas para representar as condições de controle seqüencial, geralmente baseando-se nos conceitos de álgebra booleana, utilizando-se de seus teoremas para a manipulação e simplificação das expressões obtidas. A partir das funções lógicas obtidas é possível implementar, por exemplo, circuitos digitais para a realização do controle, uma vez que baseiam-se em lógica binária. Esta técnica é adequada para a solução de problemas envolvendo sistemas de controle seqüencial de pequeno porte.

Neste contexto, conforme se amplia a complexidade do sistema que se deseja controlar, mais complexo torna-se o projeto do sistema de controle. Mantendo a mesma abordagem para a realização do projeto do sistema de controle, a solução é a representação dos vários processos, envolvendo dispositivos

independentes, através de máquinas de estado e grafos reduzidos [SILVA(1986)]. Nestas circunstâncias, o problema passa a ser a sincronização destas várias máquinas que faz emergir o problema de explosão combinatório de estados no caso de modelar-se sistemas flexíveis de grande porte. Outras limitações desta técnica de modelagem está em:

- representar globalmente o estado do sistema: desta forma, qualquer alteração no sistema implica na necessidade de projeto de um novo modelo;
- não permitir uma descrição baseada em refinamentos sucessivos: não admite uma abordagem hierárquica.

A outra alternativa consiste em aplicar ferramentas matemáticas capazes de descreverem características peculiares aos SIM, conforme descrito no Capítulo 2, de forma consistente e mais eficiente. Neste contexto, foi proposto o E-MFG para estabelecer as seguintes facilidades:

- capacidade de descrição de sistemas produtivos dirigidos por eventos de maneira menos complexa;
- capacidade de realização de modificações locais em virtude da ocorrência de alterações no sistema, demonstrando a flexibilidade da ferramenta;
- capacidade de uma descrição progressiva, baseada em vários níveis de abstração;
- capacidade de descrição das estratégias de controle seqüencial e conhecimento não procedural através de regras de produção e;
- capacidade de descrição consistente do intercâmbio de informações entre o dispositivo de controle e o objeto de controle, para a realização do controle.

Para aprimorar o método de modelagem baseado em E-MFG é proposta, a seguir, uma interpretação para a estrutura do vetor de atributos das marcas

individuais e uma metodologia para a especificação do modelo E-MFG a partir de uma abordagem hierárquica baseada em vários níveis de abstração.

5.6.2 MODELO CONCEITUAL DO VETOR DE ATRIBUTOS

Em virtude da dificuldade de manipular-se os atributos das marcas individuais em sistemas complexos de grande porte, propõe-se um modelo conceitual para os campos de atributos de uma marca individual para descrever um procedimento de interpretação destes atributos. Este recurso é importante para orientar o processo de especificação dos atributos de forma estruturada.

A Figura 5.11 ilustra o modelo conceitual da estrutura de uma marca. O vetor de atributos possui três componentes correspondentes aos seguintes campos fundamentais:

- Campo atividade.
- Campo distribuidor.
- Campo código.

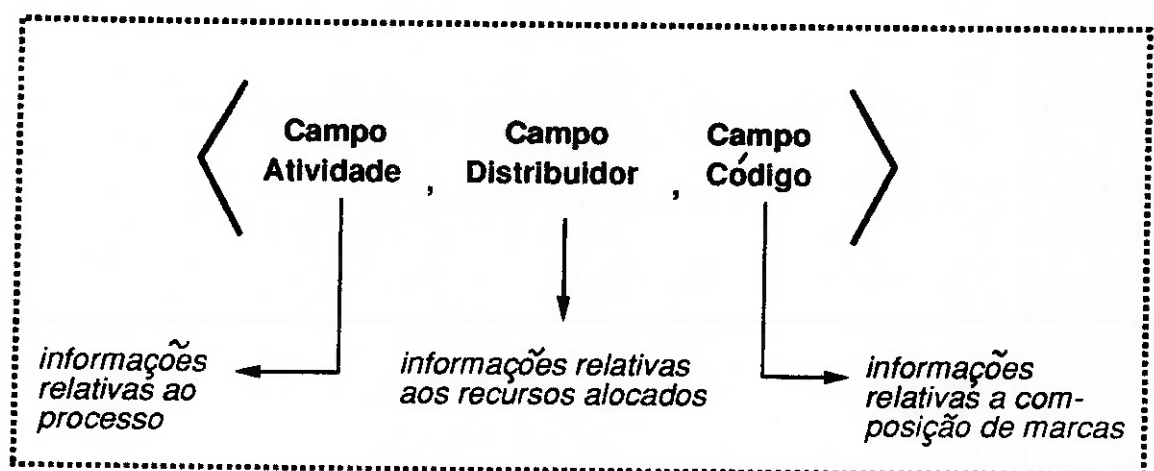


Fig. 5.11 Modelo conceitual do vetor de atributos

O campo atividade deve conter os atributos que descrevem as informações relativas aos processos realizados pelo sistema produtivo, envolvendo a

transformação de materiais. Especificamente, o estado destes atributos representa as condições das peças que estão sendo processadas a cada instante. A atualização destes atributos de uma marca individual significa a transformação de uma peça e a concomitante evolução do processo produtivo.

O campo distribuidor é reservado para os atributos que especificam o elemento que está sendo alocado para a realização de um determinado processo, ou então, representa a especificação de um elemento armazenador.

O campo código é utilizado para a representação de códigos de controle associados à composição de vetores de atributos, qualificando a marca individual como marca composta em função da existência destes códigos em sua estrutura.

A partir deste modelo conceitual, é possível aplicar-se uma abordagem hierárquica para a especificação do fluxo de informações em vários níveis de abstração, realizado a partir da evolução das marcas individuais e, especificado de forma consistente pelos atributos incorporados a estes elementos. Desta forma, é possível especificar-se a complexidade da estrutura do vetor de atributos adequadamente, de acordo com o nível de controle que se deseja realizar - controle a nível de planejamento, controle a nível de coordenação global e assim por diante.

A Figura 5.12 ilustra um exemplo de hierarquia aplicada aos atributos pertinentes ao campo distribuidor.

Neste contexto, uma forte razão que motivou a proposta deste procedimento de modelagem hierárquica dos atributos, a partir de um modelo conceitual, reside no fato de o mesmo problema de ausência de interpretação inerente ao MFG - quando se pretende realizar o processo de modelagem a despeito da metodologia MFG/PFS - instanciar-se novamente, só que a nível de estrutura dos atributos agregados às marcas. Este aspecto de propiciar uma

interpretação para a estrutura do vetor de atributos é fundamental para que os processos de filtragem seletiva e alteração condicionada destes elementos sejam executados de forma sistemática e eficiente.

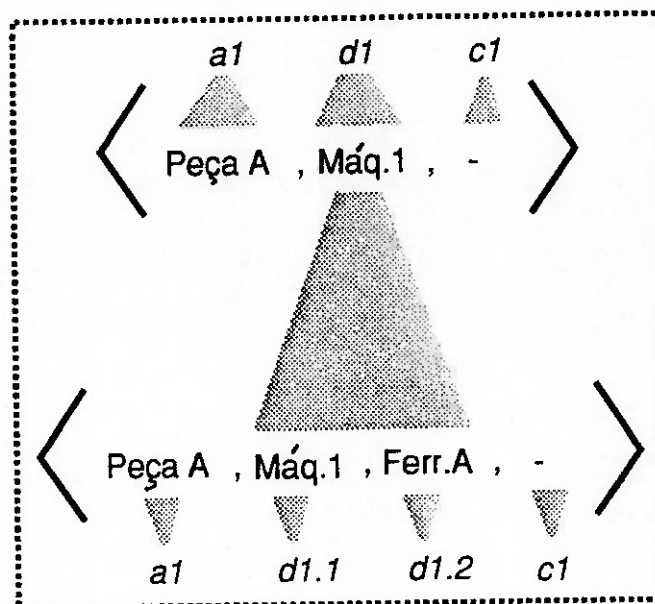


Fig. 5.12 Exemplo de hierarquia aplicada aos atributos

5.6.3 A METODOLOGIA E-MFG/PFS

Para a modelagem de sistemas produtivos genéricos é de extrema importância a disponibilidade de uma metodologia de projeto que proporcione:

- uma descrição conceitual através de linguagem natural;
- uma transição gradual e sistemática deste modelo conceitual para especificações formais;
- uma descrição estruturada do sistema e;
- uma interpretação para o modelo detalhado do sistema.

Baseado nestes fatos, é de fundamental importância que haja como suporte uma metodologia para orientar a descrição de sistemas em E-MFG.

Considerando-se a hipótese de que a descrição do comportamento dinâmico de um SIM baseia-se na representação do fluxo de itens presente neste sistema, o PFS pode ser aplicado para gerar um modelo conceitual, a exemplo do que foi realizado em MIYAGI (1988).

Neste contexto, o objetivo é substituir adequadamente os elementos PFS por elementos E-MFG. Uma vez que houve 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:

- um elemento distribuidor representa uma entidade que apenas armazena itens sem transformá-los;
- um elemento atividade representa uma entidade que transforma os itens sem armazená-los e;
- 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 baixo.

Entretanto, é necessário propor uma extensão à metodologia MFG/PFS que também permita a representação hierárquica das estratégias de controle relacionadas às informações contidas nos atributos. Neste contexto, propõe-se, a seguir, um conjunto de procedimentos que constitui a base da metodologia E-MFG/PFS que pode ser sintetizada em cinco etapas fundamentais:

- 1) Representar o sistema produtivo a ser modelado por um modelo PFS conceitual.
- 2) Substituir progressivamente os elementos atividades e os elementos distribuidores por elementos E-MFG.
- 3) Representar a alocação de recursos a partir de distribuidores que posteriormente devem ser substituídos por elementos E-MFG.

- 4) Refinar sucessivamente as atividades, em correspondência com os vários níveis hierárquicos existentes.
- 5) Representar as condições de controle adicionais e considerar um modelo conceitual do tipo <Campo atividade , Campo distribuidor , Campo código> para a estrutura do vetor dos atributos das marcas individuais, aplicando-se uma abordagem hierárquica, condizente com uma especificação adequada dos processos de filtragens seletivas e alterações condicionadas destes atributos.

Aplicando-se esta metodologia, é possível obter um modelo do sistema controlado, compatível com o nível de controle que se deseja realizar (nível de planejamento, nível de coordenação global, nível de coordenação dos subsistemas ou nível de controle local).

A seguir, apresenta-se alguns aspectos fundamentais relacionados a alocação de recursos e especificação de regras adicionais para o controle de sistemas de manufatura.

5.6.4 ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM E-MFG

A especificação das atividades requer a representação dos recursos necessários para que estas atividades sejam executadas. Para a descrição destes recursos no processo de modelagem utilizam-se elementos distribuidores de forma que o número de marcas contido nestes elementos corresponde ao número de recursos alocados. Os arcos de saída destes elementos são conectados às transições de entrada que indicam o início das respectivas atividades e os arcos de entrada destes distribuidores originam-se das transições de saída das atividades correspondentes. Desta forma, o início de uma atividade agrega recursos e o término de uma atividade libera recursos.

A Figura 5.13 ilustra exemplos de mecanismos de sincronização entre atividades e os respectivos recursos [MIYAGI(1988)]. A Fig. 5.13(a) corresponde a uma seqüência de atividades encadeadas que se utilizam dos mesmos recursos. Por sua vez, a Fig 5.13(b) corresponde a um compartilhamento de recursos.

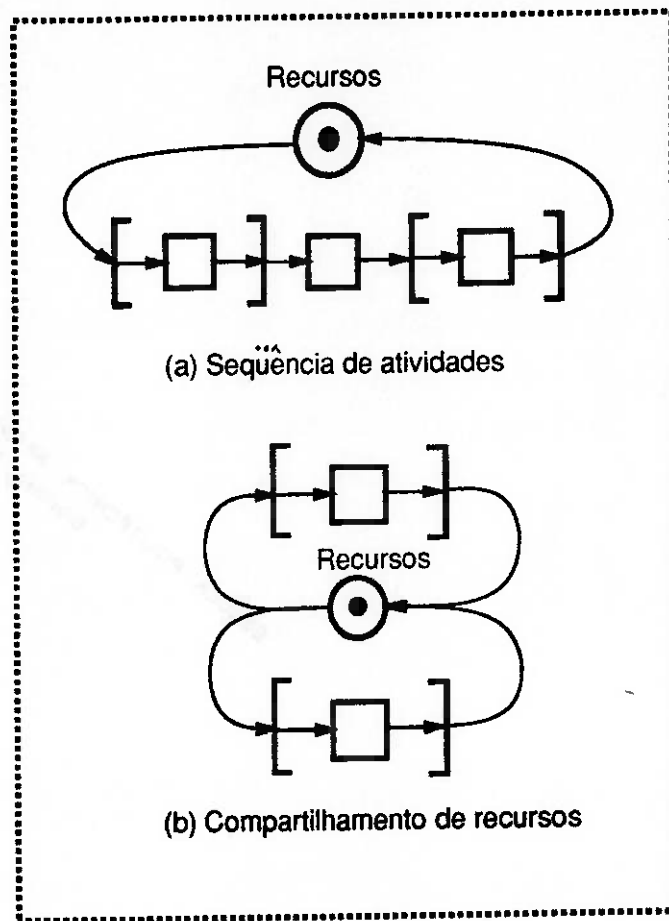


Fig. 5.13 Exemplo de alocação de recursos

5.6.5 PROCEDIMENTOS PARA A ESPECIFICAÇÃO DO CONTROLE ADICIONAL

A metodologia E-MFG/PFS possibilita a descrição de um sistema de acordo com o fluxo de itens obtendo-se, a partir do modelo conceitual PFS, o modelo detalhado E-MFG, incluindo as condições pertinentes à alocação de recursos. Entretanto, para que o comportamento dinâmico deste sistema corresponda às especificações desejadas, é necessário adicionar as condições de controle que assegurem uma eficiente execução das atividades programadas.

5.6.5.1 Controle do Início e Término de cada Atividade

O modelo E-MFG obtido a partir da aplicação da metodologia E-MFG/PFS estabelece condições relacionadas à alocação de recursos para controlar o início e término de uma determinada atividade. Entretanto, quase sempre estas condições não são suficientes para a realização do controle de forma consistente. É possível necessitar-se da representação de condições adicionais de controle que podem ser classificadas em:

- Condições adicionais internas.
- Condições adicionais externas.

As condições adicionais internas representam as relações de dependência entre o início ou término de uma determinada atividade e o estado de uma outra atividade. Estas condições internas podem ser descritas por portas habilitadoras e/ou inibidoras internas, admitindo inscrições fixas nos arcos para a especificação do controle associado ao estado dos atributos das marcas.

As condições adicionais externas vinculam o início ou término de uma determinada atividade ao estado de elementos externos. Estas condições externas

podem ser descritas por portas habilitadoras e/ou inibidoras externas com ou sem inscrições fixas e arcos de sinal de saída com ou sem inscrições variáveis.

A Figura 5.14 ilustra modelos que representam estas condições adicionais para o controle do início e término de atividades.

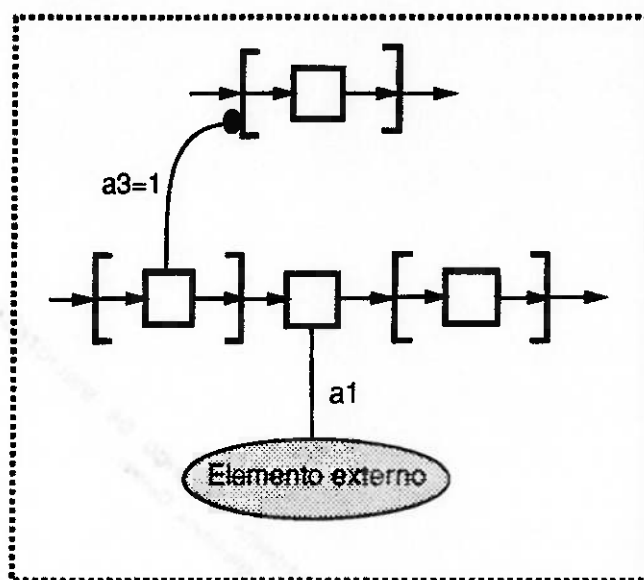


Fig. 5.14 Exemplo de modelagem de controle adicional de início e término de atividades

5.6.5.2 Sincronização de Atividades

Uma vez que a ocorrência de paralelismo de atividades é freqüente em sistemas de manufatura, é necessário estabelecer critérios para a representação da sincronização que determina o início ou o término de sub-atividades que se relacionam cooperativamente.

Para modelar-se a sincronização de atividades em E-MFG basta unificar as transições que representam os eventos que se deseja sincronizar, conforme ilustra a Figura 5.15. No caso de haver a especificação de restrições adicionais de disparo

nestas transições, é necessário realizar uma operação "AND"(E) lógica de todas as restrições especificadas, de forma a associar este novo conjunto de regras à transição que estabelece a sincronização.

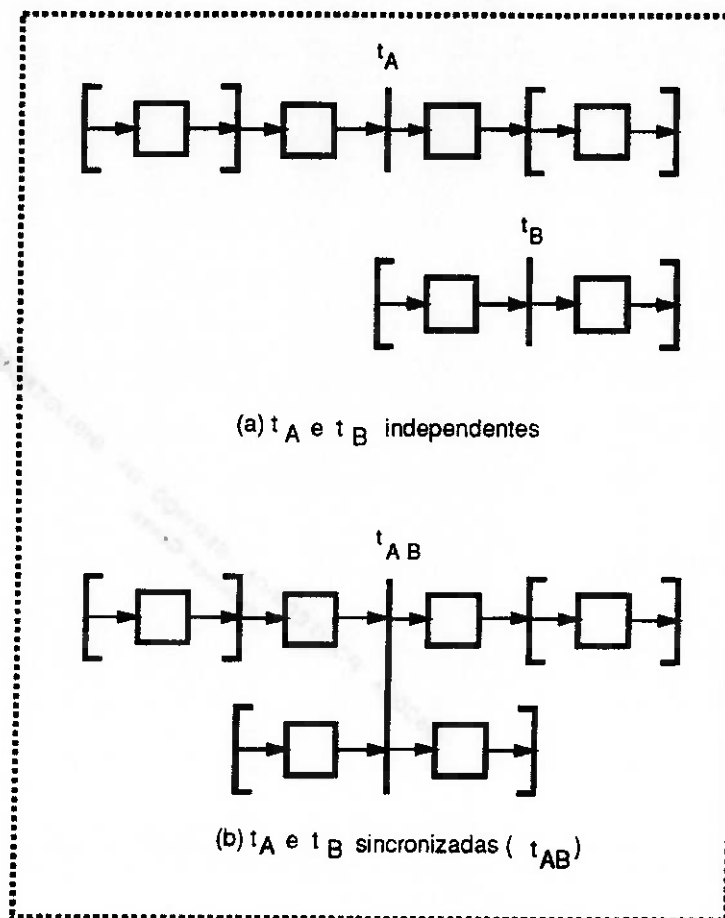


Fig. 5.15 Exemplo de sincronização de atividades

5.6.5.3 Arbitração de Conflitos

Em situações de conflito, envolvendo a convergência ou divergência de eventos mutuamente exclusivos, é necessário a introdução de um árbitro para realizar o controle do disparo das transições que descrevem estes eventos.

Há três formas básicas para descrever-se esta arbitragem:

- a) A partir da especificação de uma seqüência fixa de disparo das transições em conflito;
- b) A partir da especificação de um conjunto de regras que determinam uma prioridade fixa para o disparo das transições;
- c) A partir da especificação de estratégias de controle, em função do estado global do sistema, para a determinação de uma seqüência de disparo das transições.

Estas regras de controle podem ser realizadas e conectadas ao modelo E-MFG da seguinte forma:

- Diretamente, através de portas habilitadoras e/ou inibidoras conectadas entre o "box-conflito" e as respectivas transições, podendo conter inscrições nos arcos;
- A partir de sub-grafos E-MFG que descrevem as regras de arbitragem, conectados às transições em conflito através de arcos orientados ou portas;
- Por meio de árbitros externos que realizam as estratégias de controle desejadas através de mecanismos de controle lógico externos, conectando-se às transições em conflito por meio de portas habilitadoras e/ou inibidoras.

A Figura 5.16 ilustra exemplos básicos de arbitragem de conflitos:

- Na Fig. 5.16(a) realiza-se um controle de ordem fixa para o disparo das transições em conflito através de "boxes" virtuais representados em E-MFG;
- A Fig. 5.16(b) representa estratégias de controle realizadas a partir de informações vinculadas ao estado dos atributos agregados às marcas e;
- A Fig. 5.16(c) representa um árbitro externo acoplado ao grafo E-MFG.

5.6.5.4 Controle do Número Máximo de Ítems

Em diversas situações práticas é necessário estabelecer regras adicionais de controle para impedir falhas na manutenção do fluxo de materiais no sentido de ultrapassar o limite máximo de ítems que podem ser armazenados, transportados ou processados pelos diversos elementos que compõem o sistema produtivo.

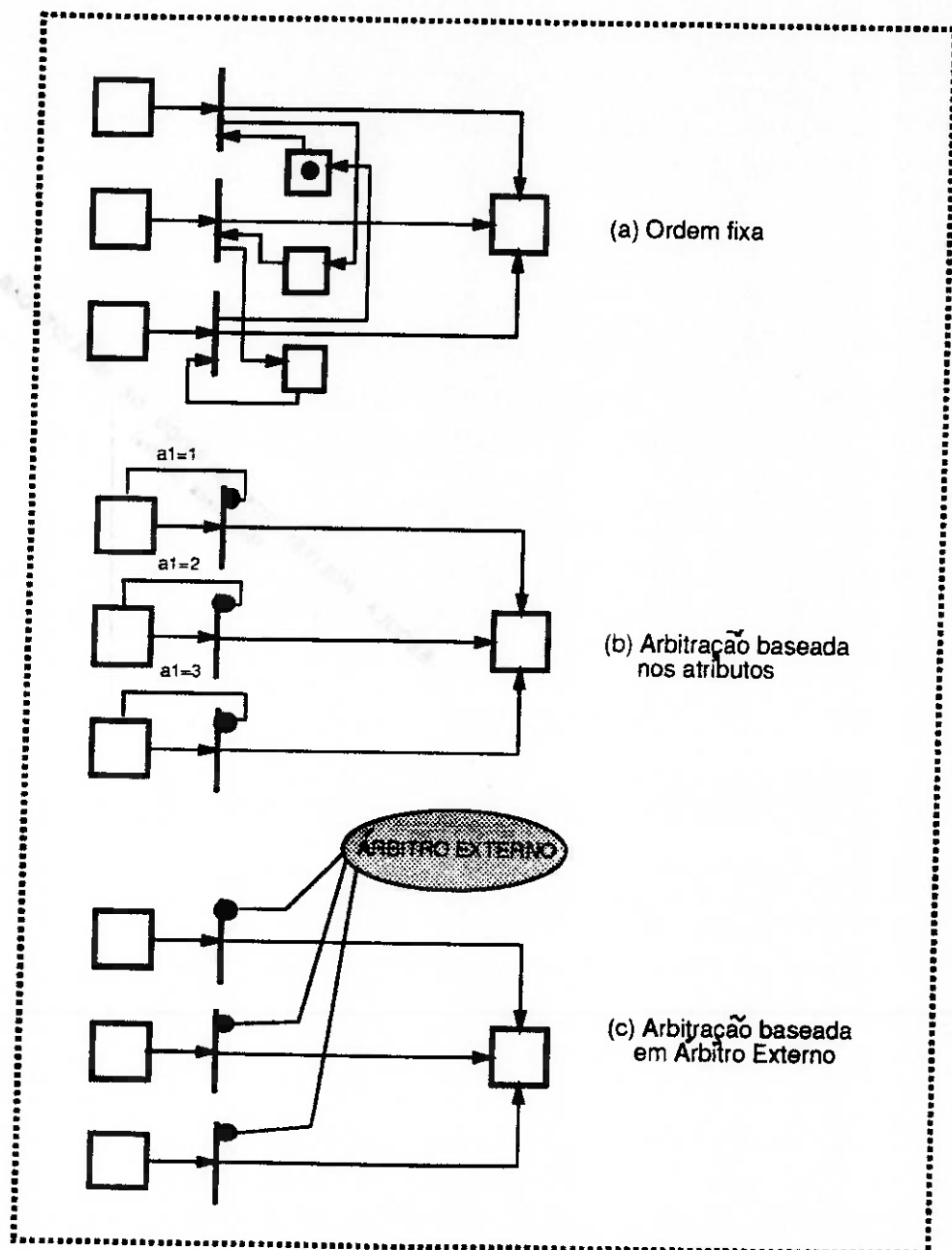


Fig. 5.16 Exemplos de arbitragens de conflitos

Uma das formas de descrição das condições adicionais de controle, para evitar a ocorrência destas falhas, pode ser realizada em E-MFG a partir de "boxes" virtuais do tipo capacidade. Estes "boxes" são conectados entre as transições que representam o início e término do fluxo de materiais em uma determinada secção do processo produtivo onde ocorre o problema. A Figura 5.17 representa exemplos de realização de controle de fluxo de materiais [MIYAGI (1988)].

Outra forma de especificar-se este tipo de controle consiste na utilização de portas inibidoras conectadas na transição em que se inicia o fluxo. A Fig. 5.17(b) representa esta forma de controle.

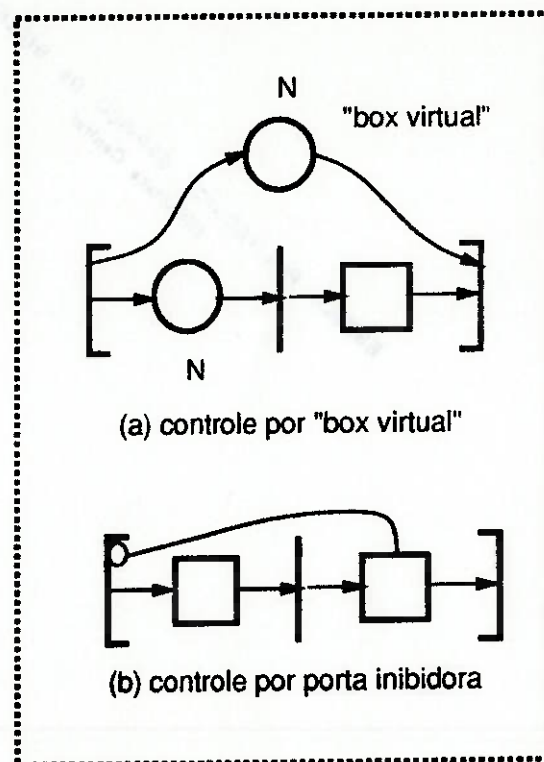


Fig. 5.17 Exemplos de controle do fluxo de itens em unidades com capacidade limitada

Capítulo 6

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E-MFG/PFS PARA O CONTROLE DE VATs

6.1 INTRODUÇÃO

A complexidade do problema de gerenciamento do fluxo de materiais em um SIM está diretamente relacionado ao grau de flexibilidade de suas unidades de produção e, principalmente, à flexibilidade do sistema de transporte que realiza o fluxo de materiais responsável pela integração destas unidades.

Se for considerado o caso extremo em que é necessário controlar o fluxo de itens entre estações de trabalho, a partir de um sistema de transporte baseado em veículos autônomos de transporte (VATs), surgem diversos problemas para a especificação do comportamento dinâmico deste sistema. A dificuldade reside em estabelecer globalmente uma seqüência de atividades para os VATs: para definir-se antecipadamente uma seqüência de estações de trabalho que cada VAT deve atender depara-se com o problema de indeterminismo em relação ao tempo, presente em sistemas dirigidos por eventos, e o problema da natureza estocástica associada ao comportamento dinâmico de um sistema de transporte deste tipo.

No sentido de propor-se uma estratégia de controle do fluxo de materiais em sistemas com este grau de complexidade, utiliza-se uma técnica que avalia de forma sistemática todas as possibilidades de ocorrência de "deadlock" em virtude do gerenciamento do fluxo de itens, baseado no trabalho desenvolvido por YOSHIDA (1988).

Esta técnica, após verificar os possíveis estados de "deadlock", estima o estado anterior ao "deadlock" e, a partir desta informação, é especificada as estratégias de controle adequadas para evitar os possíveis estados de "deadlock" previstos.

Neste Capítulo, apresenta-se um exemplo de sistema produtivo flexível capaz de produzir diversos produtos conjuntamente, 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 VATs.

Para controlar o sistema de transporte de forma consistente, no sentido de evitar-se o estado de "deadlock" provocado por um fluxo de materiais inadequado, aplica-se a técnica para solução do "deadlock", anteriormente mencionada, obtendo-se, desta forma, regras adicionais para o controle dos VATs, incorporadas de maneira eficaz ao modelo E-MFG do sistema.

6.2 ESPECIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUFATURA

A seguir, especifica-se um sistema de manufatura flexível para aplicar-se a metodologia E-MFG/PFS em seu processo de modelagem e especificação do controle.

6.2.1 ESTRUTURA

Basicamente, é constituído por:

- Quatro estações de trabalho para processamento: EST.1, EST.2, EST.3 e EST.4. Cada uma destas estações possuem um magazine de entrada (MAGin), outro de saída (MAGout), cada um com capacidade para armazenar até quatro elementos, e uma máquina-ferramenta (MAQ) que processa um produto por vez;
- Uma estação de entrada de materiais (EST.in) que armazena o estoque de matéria-prima necessário;
- Uma estação de saída (EST.out) que armazena os estoques de produtos prontos;
- Três VATs e;
- Um estacionamento (ESTAC) para os VATs.

A Figura 6.1 representa a estrutura básica deste sistema, representando o circuito, as estações, o estacionamento dos VATs e os vários pontos de ramificação e confluência.

6.2.2 COMPORTAMENTO DINÂMICO

Para a realização do fluxo de materiais entre as estações, os VATs 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 VATs nas várias estações e estacionamento. À medida que os produtos são processados, os VATs são requisitados pela estação correspondente e a retirada dos produtos dos magazines de saída é realizada na ordem FIFO.

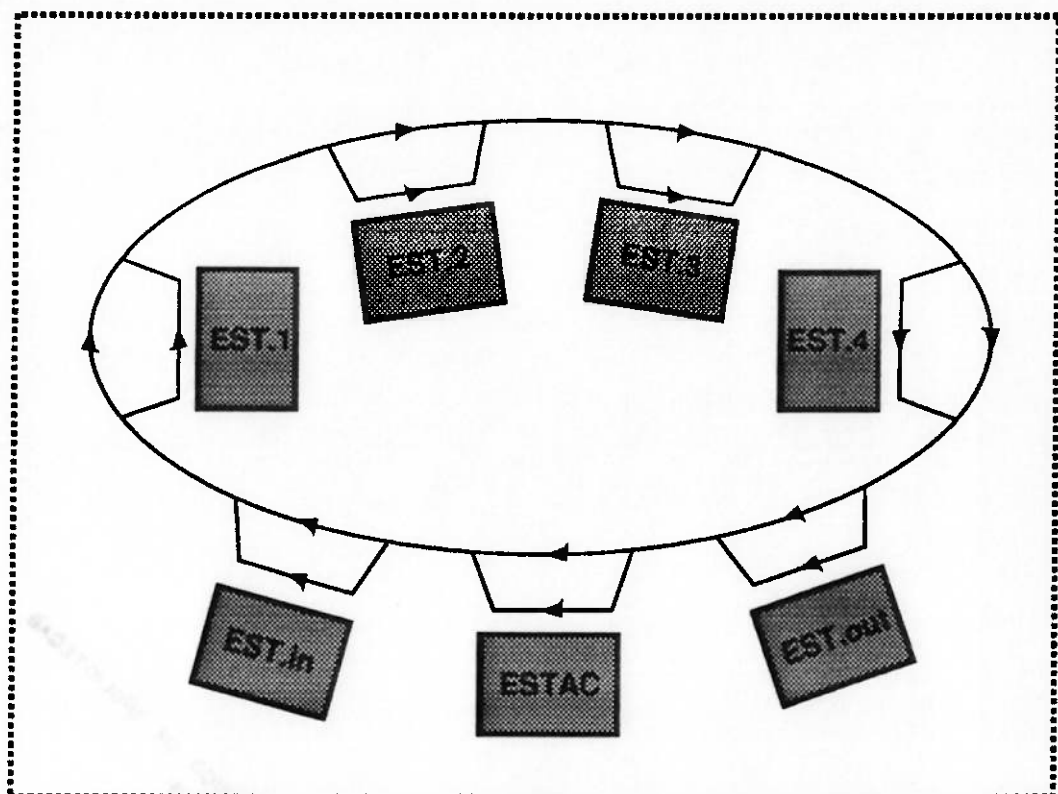


Fig. 6.1 Estrutura do sistema

No presente caso exemplo, fabrica-se três tipos de produtos: PROD.A, PROD.B e PROD.C. Cada um destes produtos possui uma determinada seqüência de operações descritas a seguir:

- PROD.A = EST.in -> EST.1 -> EST.2 -> EST.3 -> EST.4 -> EST.out;
- PROD.B = EST.in -> EST.2 -> EST.1 -> EST.3 -> EST.out;
- PROD.C = EST.in -> EST.3 -> EST.2 -> EST.1 -> EST.4 -> EST.out.

6.3 COMPOSIÇÃO DO VETOR DE ATRIBUTOS

As marcas individuais devem conter informações necessárias para a caracterização do fluxo de materiais, de acordo com a flexibilidade operacional do sistema. Neste contexto, o *campo atividade* do vetor de atributos possui três atributos fundamentais:

- a1 = tipo de produto;
- a2 = encomenda;
- a3 = rota (destino).

Para o atributo a1 estabelece-se a seguinte codificação:

- a1 = A, para produto A;
- a1 = B, para produto B;
- a1 = C, para produto C.

Em relação ao atributo a2, especifica-se uma variável genérica *Enc* que representa os possíveis códigos de encomendas a serem realizadas. Assim, se *Enc* = 7 significa que se trata da encomenda nº7.

Quanto ao atributo a3, realiza-se a codificação a seguir:

- a3 = 1, para destino EST.1;
- a3 = 2, para destino EST.2;
- a3 = 3, para destino EST.3;
- a3 = 4, para destino EST.4;
- a3 = 5, para destino EST.in;
- a3 = 6, para destino EST.out;
- a3 = 7, para destino ESTAC.

Por sua vez, o *campo distribuidor* é composto por um atributo fundamental

d1. Este atributo representa o VAT e sua codificação é:

- d1 = 1, representa o VAT nº1;
- d1 = 2, representa o VAT nº2;
- d1 = 3, representa o VAT nº3.

O *campo código* é formado por um atributo c1, utilizado apenas em situações em que ocorre composição de marcas. Para representar a ausência de um atributo em uma marca utiliza-se o símbolo "-".

De acordo com os conceitos apresentados, a estrutura do vetor de atributos pode ser representada por $\langle a_1, a_2, a_3, d_1, c_1 \rangle$. Um vetor do tipo $\langle A, 7, 1, 3, - \rangle$ representa o produto A, referente à encomenda 7, com destino a EST.1, transportado pelo VAT nº3 e acompanha uma marca que não é composta.

6.4 MODELO DO OBJETO DE CONTROLE

A planta que constitui o objeto de controle pode ser modelada conceitualmente a partir do modelo ilustrado pela Figura 6.2.

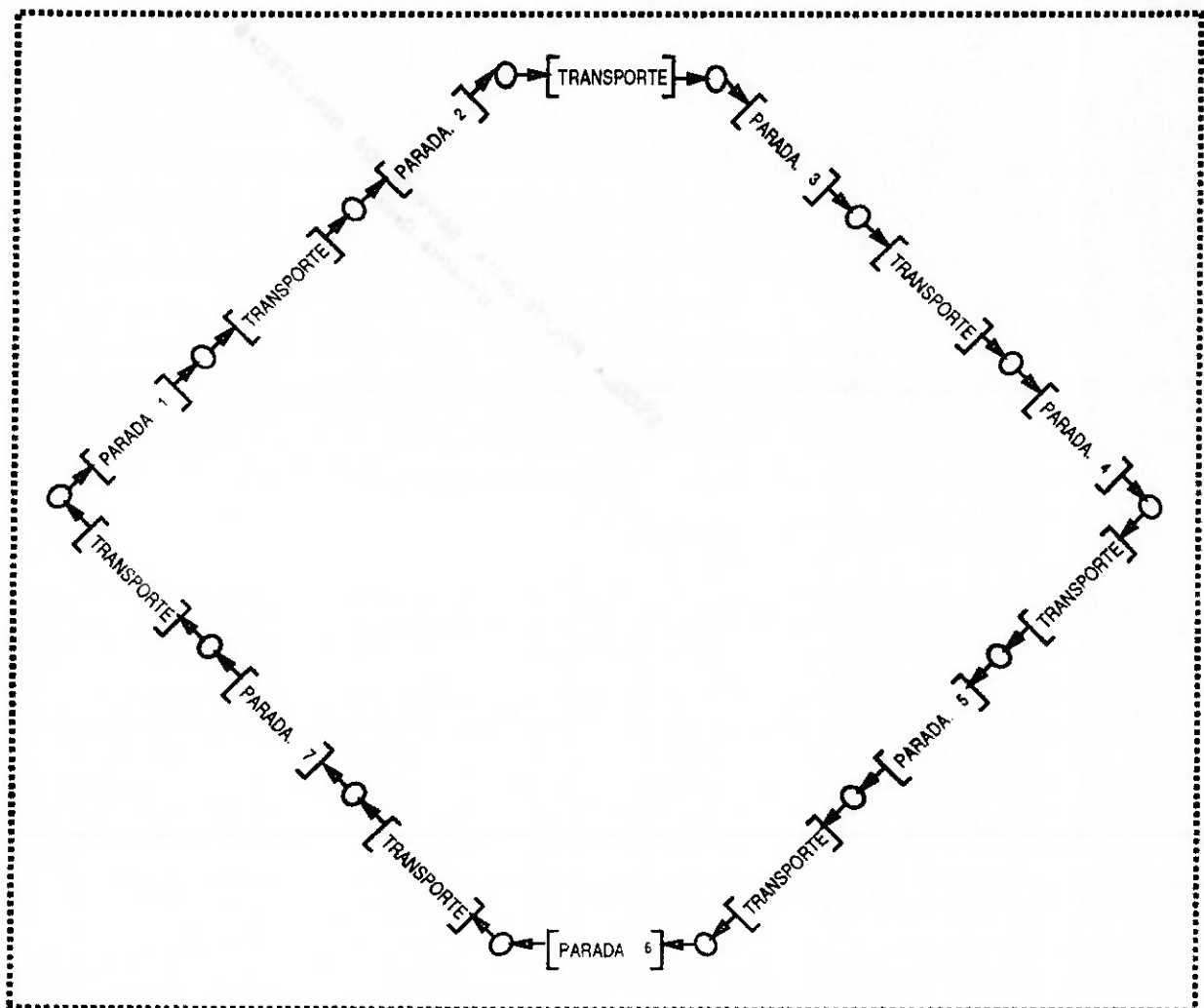


Fig. 6.2 O modelo PFS do sistema

Neste modelo PFS, o elemento '[Transporte]' corresponde à atividade de transporte realizada entre as estações de parada, enquanto os elementos '[PARADA.n]' (n variando de 1 a 7) correspondem à representação das atividades que podem ser realizadas em cada uma destas estações.

Aplicando-se a metodologia E-MFG/PFS, refina-se este modelo em vários níveis de abstração hierárquica até obter-se o modelo E-MFG adequado para a realização do controle a nível de coordenação dos subsistemas.

6.4.1 MODELO DA VIA DE TRANSPORTE

A modelagem da via de transporte baseia-se na subdivisão do trajeto em dois tipos de secções: as secções entre um ponto de ramificação e o ponto de confluência imediatamente seguinte - que corresponde às partes do trajeto onde há os desvios para as estações de parada, modeladas pelos elementos '[PARADA.n]' - e as secções entre um ponto de confluência e o ponto de ramificação imediatamente seguinte - que corresponde aos trechos do circuito que interligam as estações, representados pelos elementos '[TRANSPORTE]'.

O elemento '[TRANSPORTE]' pode ser refinado de acordo com a Figura 6.3. Corresponde a uma atividade unitária que garante que não ocorra problemas de colisão, uma vez que a via é, por hipótese, de sentido único. Portanto, quando um determinado VAT estiver ocupando a via em alguns destes trechos, haverá a presença de uma marca no "box" *Transporte Via Única* da Figura 6.3 que impede a entrada de uma nova marca, enquanto não se finaliza o transporte naquela secção. Esta condição corresponde à proibição da entrada de qualquer outro VAT no sentido de evitar uma colisão.

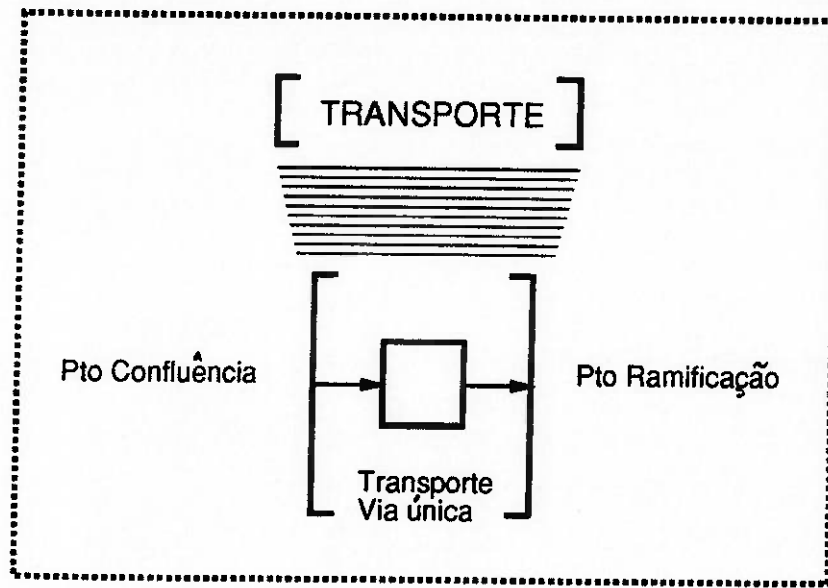


Fig. 6.3 Refinamento do elemento '[TRANSPORTE]'

Por sua vez, o elemento '[PARADA.n]' pode ser representado pelo modelo da Figura 6.4 (ilustra o caso $n=1$).

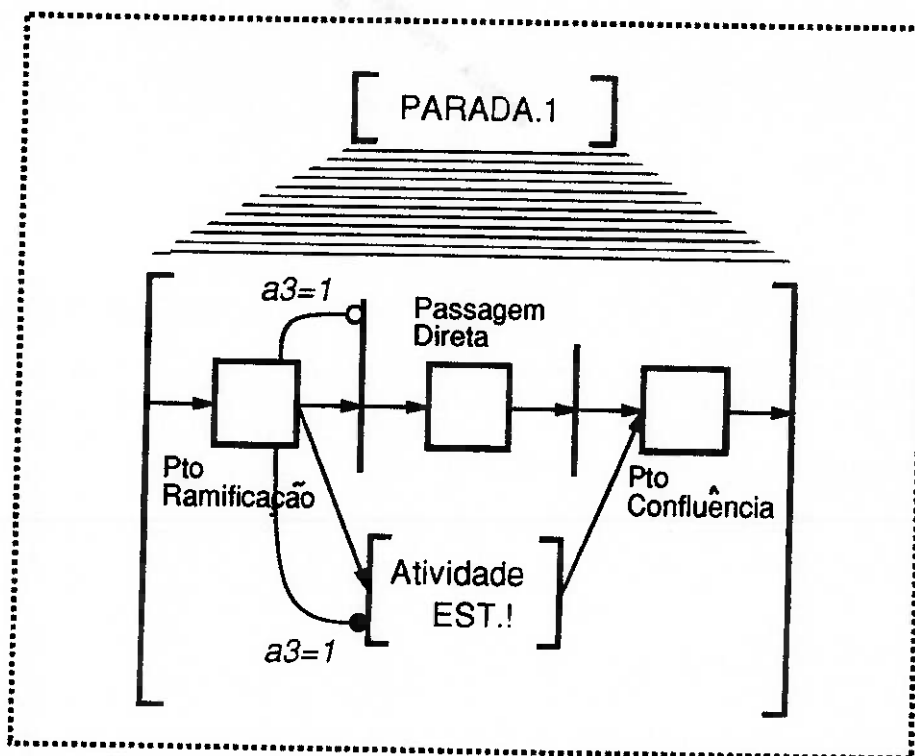


Fig. 6.4 Refinamento do elemento '[PARADA.n]'

Acompanhando-se a trajetória de um determinado VAT, assim que este alcança o ponto de ramificação que permite a entrada em uma determinada estação de parada, é verificado se aquela estação corresponde ao destino do VAT em questão. Em caso afirmativa, realiza-se o desvio para a estação. Caso contrário, continua em frente até alcançar o próximo ponto de ramificação para uma nova verificação. A existência de desvios para que um VAT atenda a uma determinada estação possibilita a ultrapassagem de outros VATs durante o atendimento.

Continuando o processo de refinamento, os próximos passos correspondem à descrição dos seguintes elementos:

- '[ATIVIDADE EST.n]', para n variando de 1 a 4: para o detalhamento do modelo das estações de processamento, descrevendo as atividades realizadas nestas unidades;
- '[ATIVIDADE EST.in]': para o detalhamento das atividades realizadas na EST.in, representando o processo de requisição de materiais;
- '[ATIVIDADE EST.out]': para o detalhamento das atividades realizadas na EST.out, descrevendo o processo de estocagem de produtos prontos;
- '[ATIVIDADE ESTAC]': para o detalhamento das atividades realizadas no ESTAC, representando o fluxo de VATs.

6.4.2 O ELEMENTO '[ATIVIDADE EST.n]'

Para a representação da seqüência de atividades realizadas em cada estação de processamento são utilizados modelos descritos pela Figura 6.5.

Inicialmente, a partir do momento em que há um VAT na estação, verifica-se se está carregado com algum material para ser processado ou não. Este teste é realizado a partir da verificação do atributo $a3$.

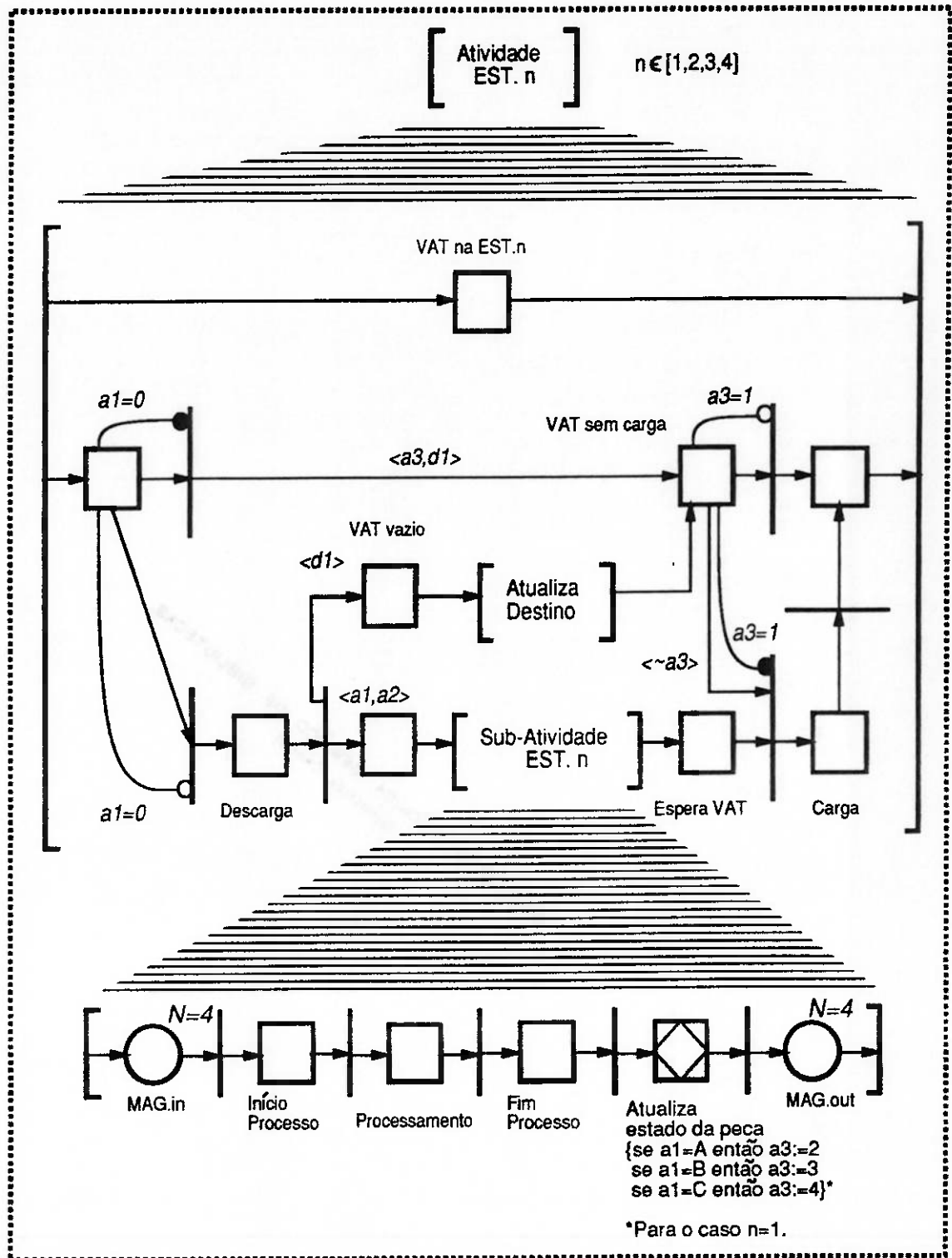


Fig. 6.5 Refinamento do elemento '[ATIVIDADE EST.n]'

Se não houver carga ($a1 = 0$), o VAT dirige-se para o magazine de saída da estação para realizar o transporte de algum produto já processado, atendendo, desta forma, a um chamado especificado pelo estado do atributo $a3$, que corresponde ao destino do VAT.

No caso do VAT estar carregado, executa-se a descarga do material para posterior processamento. Assim que o VAT volta ao estado de disponibilidade, o "box" que indica o estado *VAT vazio* é marcado e o elemento '[ATUALIZA DESTINO]' atualiza o estado do atributo *a3* desta marca: se o novo destino corresponder à própria estação requisitando transporte, esta requisição é prontamente atendida.

Em relação às etapas ligadas diretamente ao processamento, são representadas pelo elemento '[Sub-Atividade EST.n]'. Refinando-se este elemento, de acordo com a Figura 6.5, obtém-se uma seqüência de processamento descrito da seguinte forma: o material a ser processado é armazenado temporariamente no magazine de entrada (MAG.in) de capacidade $N=4$. Em seguida, este material é processado, de acordo com a ordem de entrada e um por vez. Neste sentido, os "bóxes" da Figura 6.5 indicam os estados *Início processo -> processamento -> Fim processo*. Após processadas, as peças são depositadas no magazine de saída (MAG.out) de capacidade $N=4$.

O "box" controlador atualiza o estado da marca que representa a peça depois de ser processada, de acordo com a seqüência de operações inerente a cada produto. A Figura 6.5 ilustra o procedimento de atualização para o caso em que o processo ocorre na EST.1. Para os demais casos têm-se:

a) Processo na EST.2:

```
{ se a1 = A então a3: = 3;  
  se a1 = B então a3: = 1;  
  se a1 = C então a3: = 1 }
```

b) Processo na EST.3:

```
{ se a1 = A então a3: = 4;  
  se a1 = B então a3: = 6;  
  se a1 = C então a3: = 2 }
```

c) Processo na EST.4

```
{ se a1=A então a3:=6;  
  se a1=C então a3:=6 }
```

6.4.3 O ELEMENTO '[ATIVIDADE EST.in]'

Para detalhar-se as atividades realizadas na estação de entrada de materiais EST.in realiza-se o modelo apresentado na Figura 6.6. A partir do momento em que se efetua uma requisição de material, este é retirado do depósito. Os "boxes" controladores individualizam as marcas a partir deste instante, especificando o estado do atributo *a1*, de acordo com o tipo de produto que será produzido.

Após requisitado, define-se o destino deste material a partir da atualização do atributo *a3* da marca correspondente, conforme descrito na Figura 6.6. Em seguida, os materiais requisitados são armazenados temporariamente em um magazine de entrada de capacidade *Nin*, aguardando a chegada de um VAT disponível para a carga e transporte.

É importante observar que as requisições de materiais são atendidas seqüencialmente, de acordo com a ordem dos pedidos.

6.4.4 O ELEMENTO '[ATIVIDADE EST.out]'

O modelo apresentado na Figura 6.7 representa o refinamento das atividades realizadas na estação de saída de materiais EST.out. Assim que um VAT com carga entra na estação realiza-se o processo de descarga do produto pronto, seguido de várias atividades representadas pelo elemento '[Sub-Atividade EST.out]'

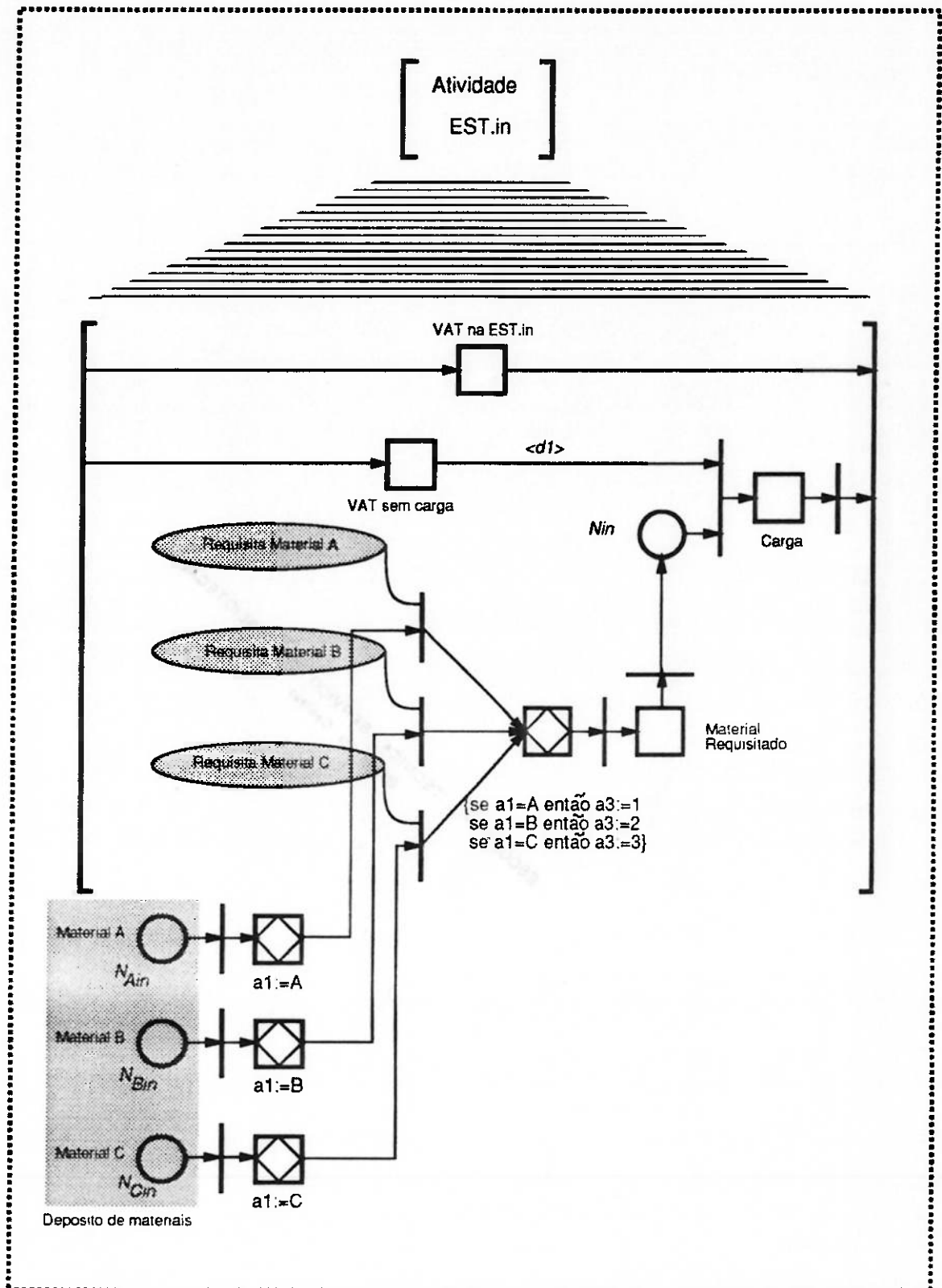


Fig. 6.6 Refinamento do elemento '[ATIVIDADE EST.in]'

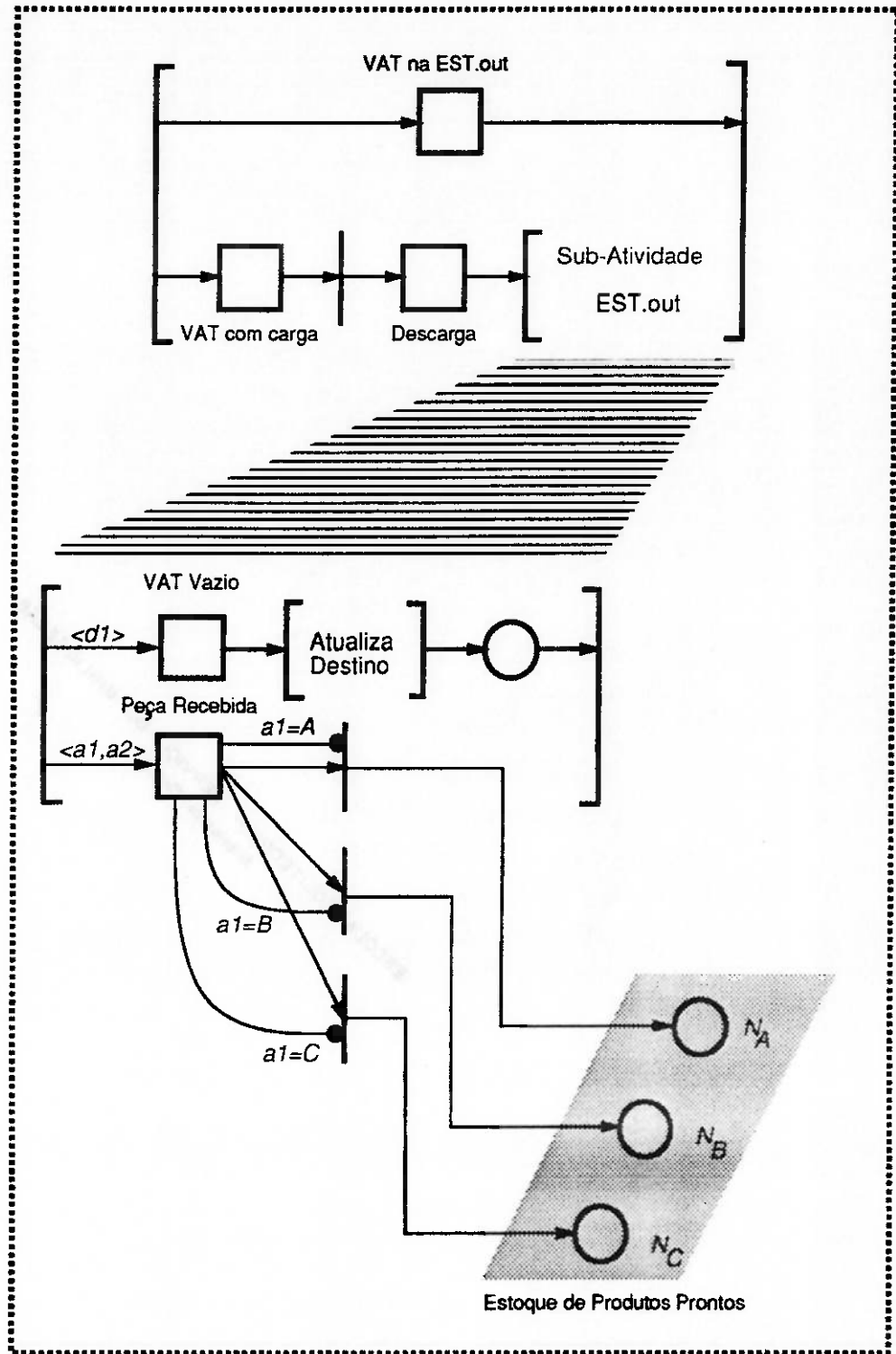


Fig. 6.7 Refinamento do elemento '[ATIVIDADE EST.out]'

Por sua vez, o elemento '[Sub-Atividade EST.out]' estabelece um novo destino para o VAT, através do elemento '[Atualiza Destino]' e seleciona o magazine adequado para o armazenamento dos produtos prontos, de acordo com a natureza de cada um.

6.4.5 O ELEMENTO '[ATIVIDADE ESTAC]'

O estacionamento de VATs ESTAC é representado pelo modelo da Figura 6.8. O "box" capacidade representa o número de VATs disponíveis (no caso tem-se $N=3$). Assim que um VAT é solicitado, o estado da marca que o identifica é atualizado a partir da informação de controle transmitida pelo elemento '[Atualiza Destino]', conforme será esclarecido na próxima secção. Recebida a informação de controle, o VAT está pronto para prosseguir para o seu destino específico.

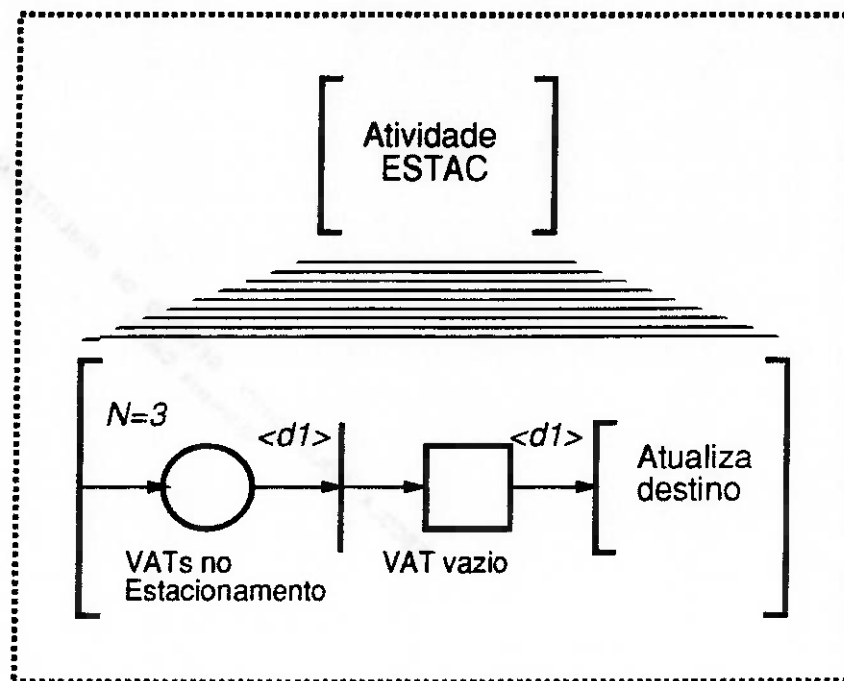


Fig. 6.8 Refinamento do elemento '[ATIVIDADE ESTAC]'

6.5 MODELO DO CONTROLE DO SISTEMA

Apresentado o modelo básico da parte operativa do sistema, a próxima etapa consiste em descrever o controle deste sistema aplicando-se a metodologia E-MFG/PFS. Esta descrição é realizada em duas fases:

- Primeira fase: especificação do controle da seqüência de operações relacionadas ao processamento de cada produto;

- Segunda fase: estabelecimento do controle do fluxo dos VATs para a realização do transporte de produtos entre as estações.

6.5.1 CONTROLE DA SEQÜÊNCIA DE OPERAÇÕES DOS PRODUTOS

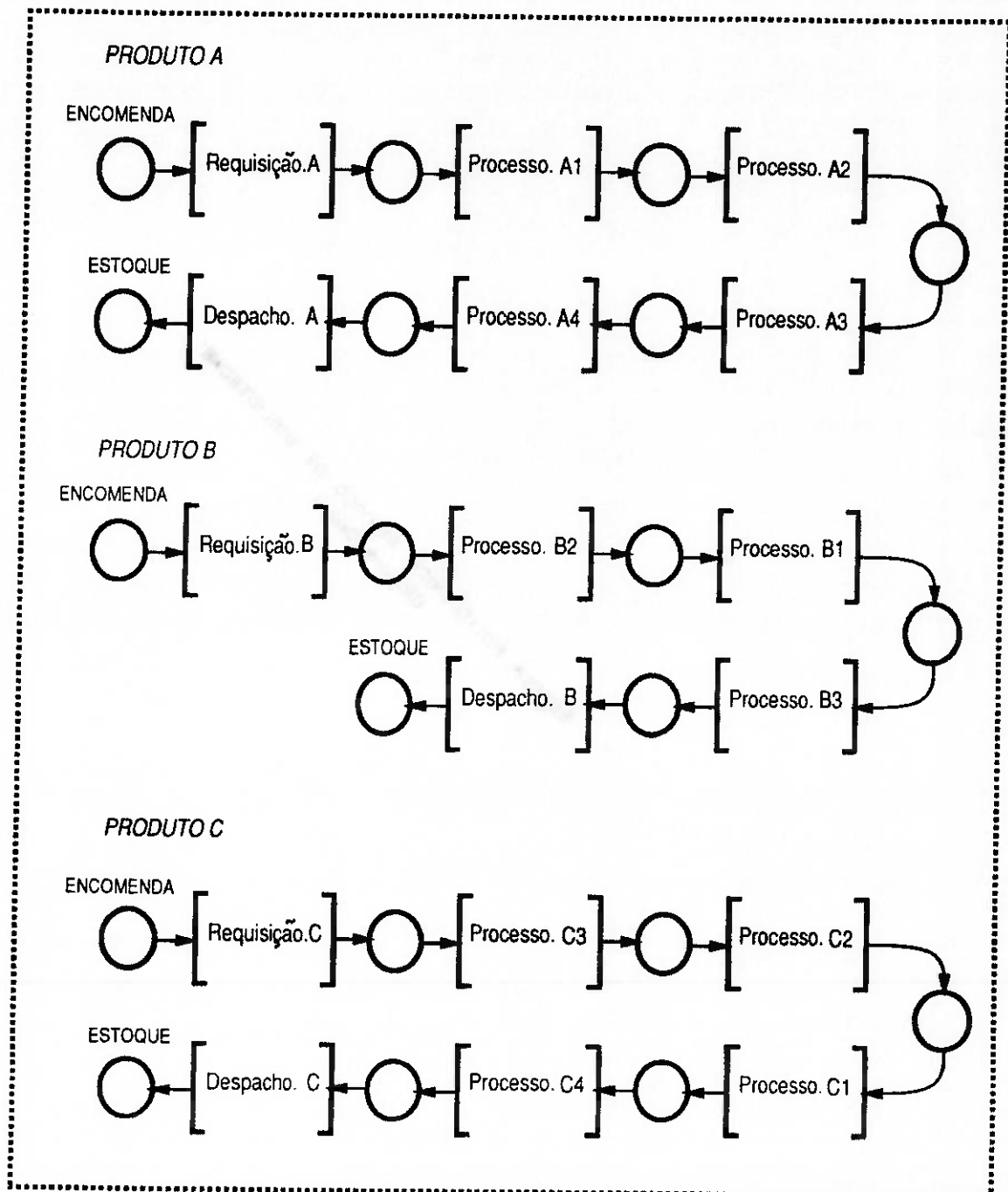


Fig. 6.9 Modelo PFS do controle da seqüência de operações de cada produto

A especificação do controle da seqüência de operações de cada produto é realizada a partir de um modelo conceitual PFS, conforme descreve a Figura 6.9.

Nestes modelos observa-se a presença de três elementos fundamentais:

- o elemento '[Processo.Xn]' relacionado ao controle das atividades de processamento do produto X na estação n;
- o elemento '[Requisição.X]' responsável pelo controle da requisição do material X de acordo com o pedido realizado;
- o elemento '[Despacho.X]' corresponde ao controle da saída do produto X pronto.

O elemento '[Processo.Xn]' corresponde ao modelo conceitual do controle das atividades relativas ao processamento de uma determinada peça X em uma estação n. A Figura 6.10 ilustra o modelo correspondente ao refinamento do elemento '[Processo.A1]' e a conexão deste modelo com a parte operativa do sistema descrita anteriormente em E-MFG na Figura 6.5.

A seqüência de operações inicia-se a partir da retirada de uma peça A do magazine de entrada MAG.in até a solicitação de um VAT para o transporte da peça processada. Para que o sistema realize esta seqüência de operações adequadamente, este modelo da parte de controle é incorporado à parte operativa através de portas habilitadoras. Neste sentido, o sistema estará controlado se obedecer a seqüência de atividades prescritas no modelo de controle. Por exemplo, voltando à Figura 6.10, a partir do momento em que o VAT foi descarregado, a peça é armazenada no MAG.in atualizando o estado do sistema no modelo do controle. Da mesma forma, outra porta habilitadora indica o início do processo e outra indica o término do processo para que o controle solicite agora um VAT para o transporte da peça pronta. Assim que é executado o processo de carga no VAT disponível, o sistema de controle é informado para que inicie o transporte para a próxima estação destino.

Neste sentido, define-se de forma semelhante o controle do processamento do produto A em outras estações e o processamento de outros produtos em outras estações.

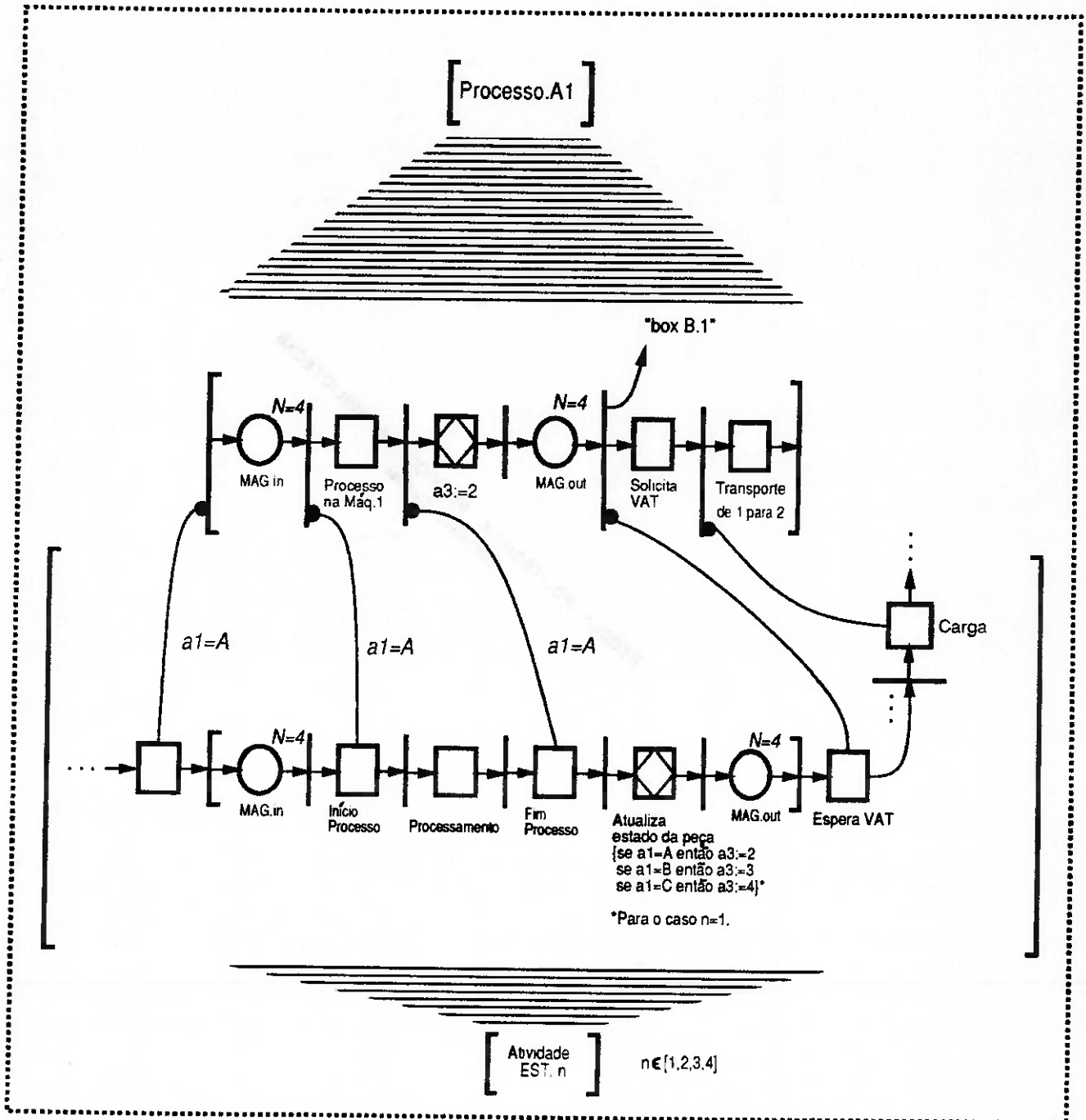


Fig. 6.10 Refinamento do elemento '[Processo.A1]' e sua conexão com o modelo da parte operativa

Quanto ao elemento '[Requisição.X]' corresponde ao modelo conceitual das operações descritas pela Figura 6.11 (ilustra a requisição do material *A*). Conforme é realizada uma encomenda, este pedido é enviado para a estação de entrada EST.in através de uma porta habilitadora que conecta este modelo ao modelo já descrito na Figura 6.6. a partir do momento em que se dispõe do material requisitado, esta informação retorna ao controle para solicitar um VAT para o posterior transporte do material a ser processado.

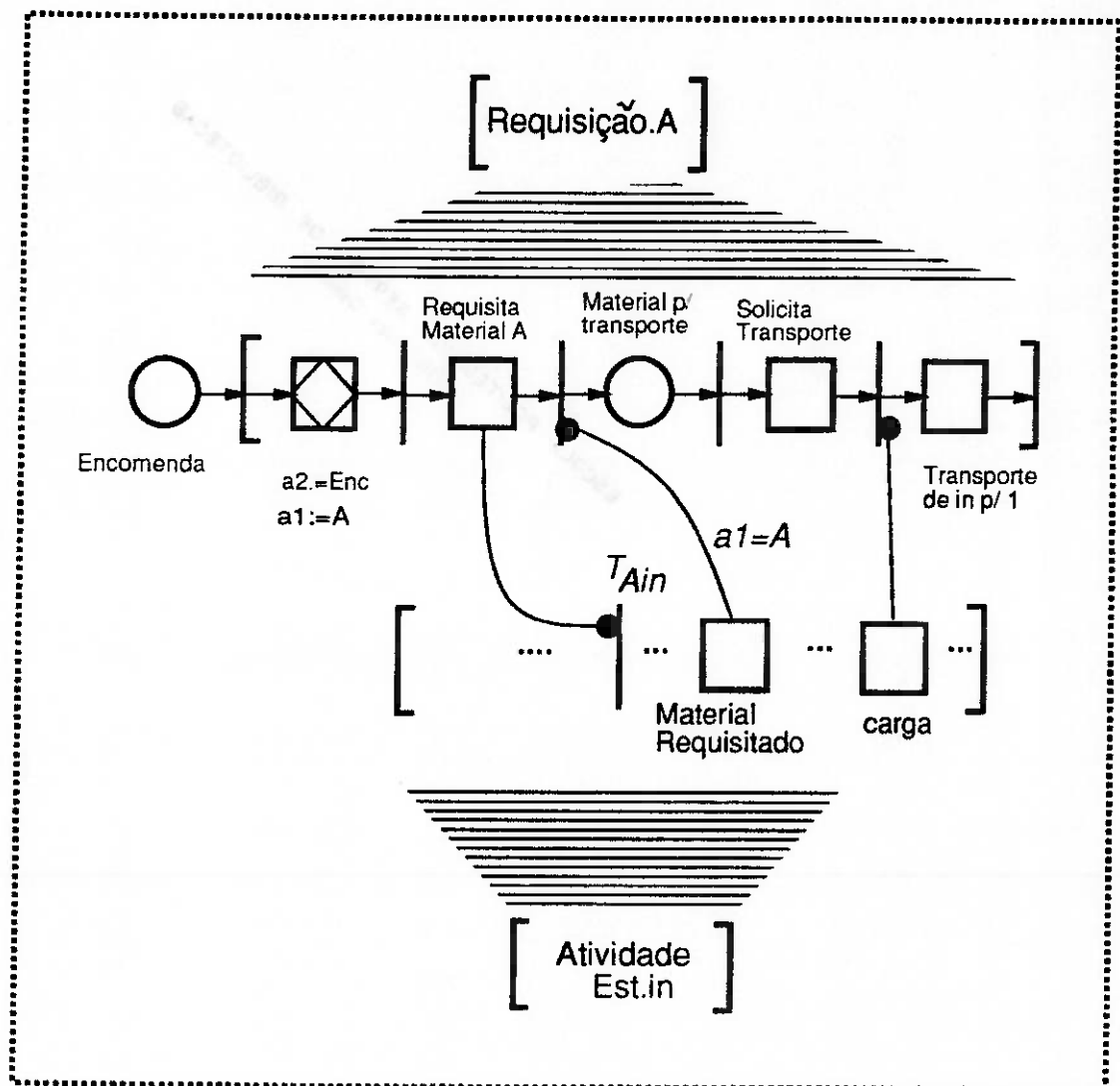


Fig. 6.11 Refinamento do elemento '[Requisição.A]' e sua conexão com o modelo da parte operativa

Por sua vez, o elemento '[Despacho.X]' representa o modelo conceitual para o controle da estocagem dos produtos prontos. A Figura 6.12 ilustra o exemplo de transporte do produto *A* para o estoque. Assim que o VAT carregado com este produto chega na estação de saída EST.out, esta informação é enviada para o sistema de controle que permanece aguardando a confirmação de *produto recebido*.

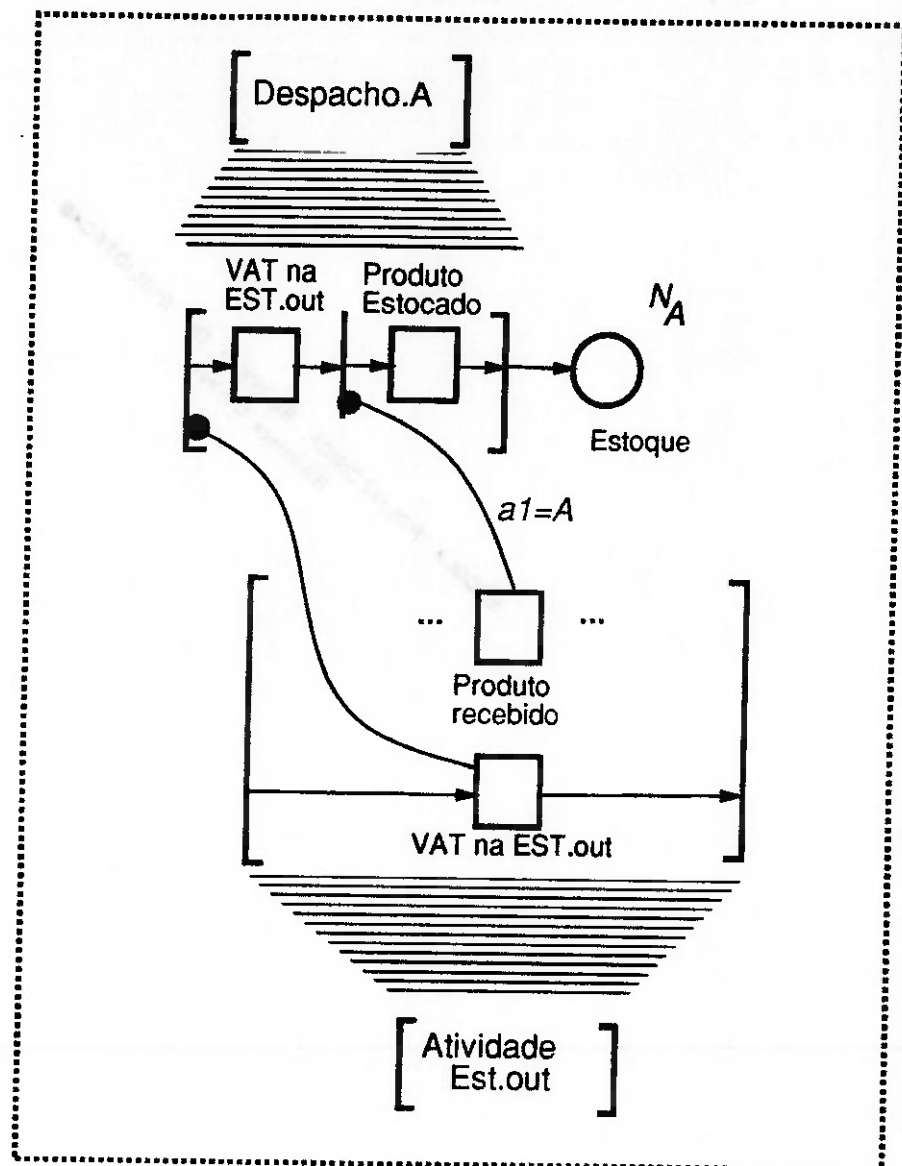


Fig. 6.12 Refinamento do elemento '[Despacho.A]' e sua conexão com o modelo da parte operativa

6.5.2 CONTROLE DO FLUXO DE VATs

A solicitação de transporte é realizada a partir do controle da seqüência de operações de cada produto. No instante em que é solicitado um VAT, esta informação gera uma marca no "box" correspondente à origem do pedido. Por exemplo, no caso de ser realizado o processamento da peça *A* na EST.1 - conforme descreve a Figura 6.10 - no instante em que é solicitado o transporte, é armazenada uma marca no "box" *B.1*.

Portanto, o sistema de controle dos VATs recebe os pedidos a partir da marcação de cinco "boxes" fundamentais:

- o "box" *B.in*: indica a solicitação de um VAT para o transporte na EST.in;
- o "box" *B.1*: indica a solicitação de um VAT para o transporte na EST.1;
- o "box" *B.2*: indica a solicitação de um VAT para o transporte na EST.2;
- o "box" *B.3*: indica a solicitação de um VAT para o transporte na EST.3;
- o "box" *B.4*: indica a solicitação de um VAT para o transporte na EST.4.

A Figura 6.13 ilustra o modelo básico do sistema de controle do fluxo de VATs proposto. Recebido o pedido de VATs das estações, através dos "boxes" *B.x* correspondentes, o sistema de controle verifica a existência de algum VAT disponível em cada uma das estações, a partir das portas habilitadoras. Em caso afirmativo, este VAT é deslocado para o correspondente destino, havendo prioridade de atendimento para o caso em que a solicitação origina-se da própria estação em que há um VAT disponível. Esta prioridade é modelada a partir das portas inibidoras presentes na Figura 6.13.

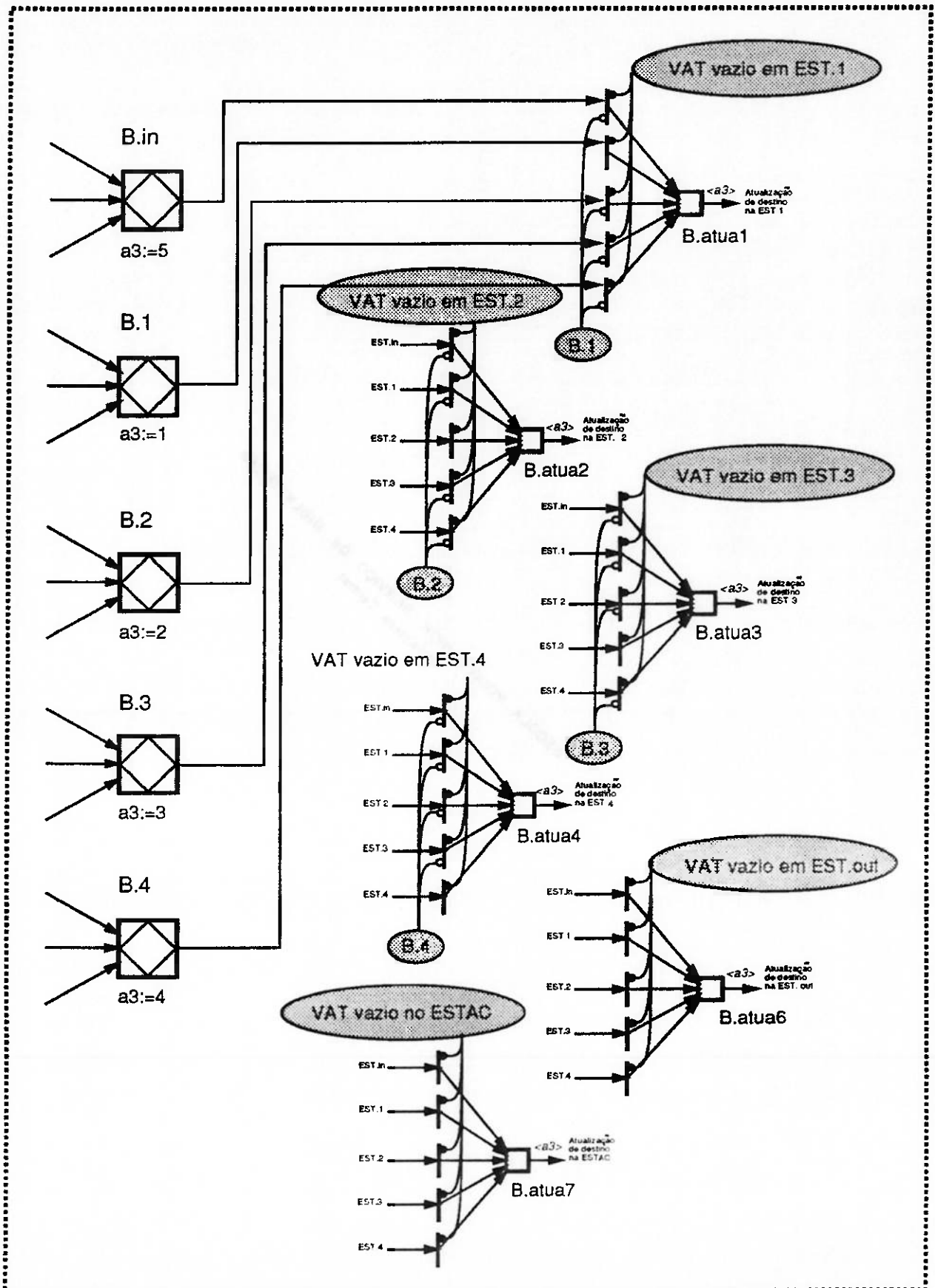


Fig. 6.13 Modelo do sistema de controle dos VATs

A partir do momento em que o sistema de controle estabelece um VAT para atender a solicitação de transporte, esta informação é enviada para o objeto de controle por intermédio do elemento '[Atualiza Destino]'. No caso das estações de processamento e da estação de saída este elemento pode ser refinado de acordo com a Figura 6.14 (ilustra o caso da EST.1).

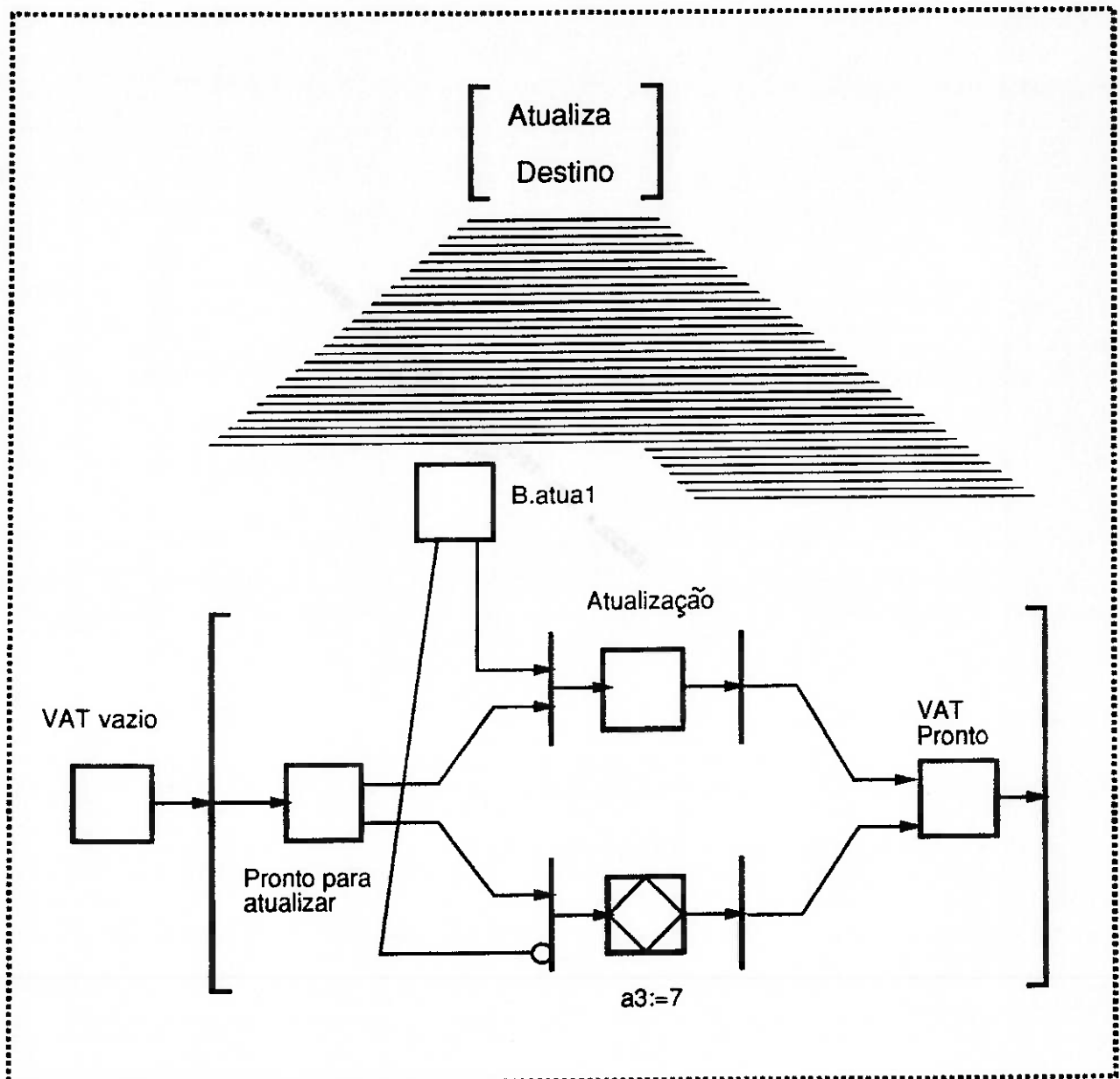


Fig. 6.14 Refinamento do elemento '[Atualiza Destino]' e sua conexão com o sistema de controle dos VATs para o caso das estações de processamento e de saída

Se houver uma solicitação de transporte instanciada pela presença de uma marca no "box" *B.atuax*, realiza-se a atualização atribuindo uma determinada estação como destino para o VAT. Caso não haja marca no "box" *B.atuax*, o VAT disponível na estação é mandado para o estacionamento.

Para o caso do estacionamento, assim que é solicitado um VAT, o "box" *B.atua7* é marcado, determinando-se desta forma o destino para este VAT. A Figura 6.15 ilustra o modelo correspondente.

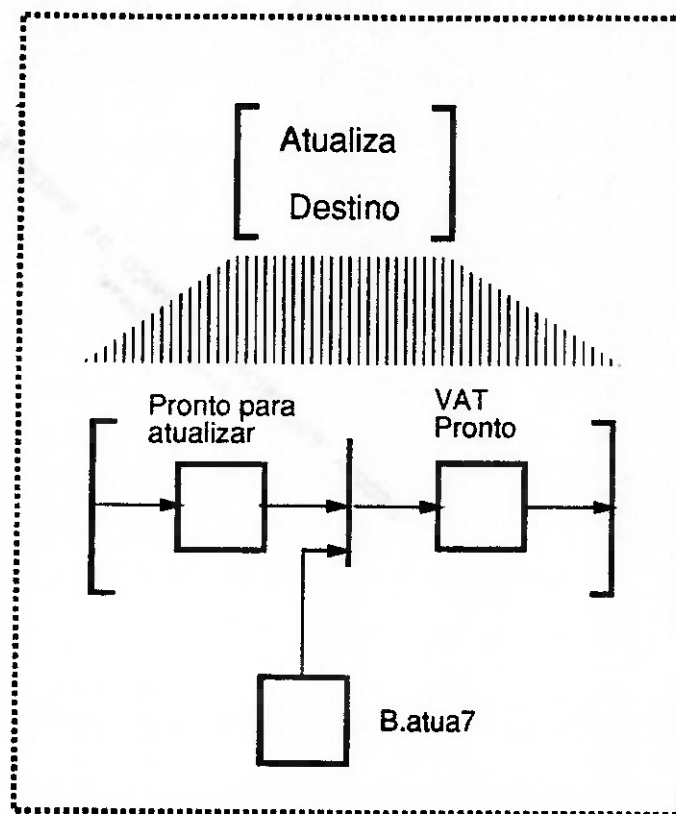


Fig. 6.15 Refinamento do elemento '[Atualiza Destino]' e sua conexão com o sistema de controle dos VATs para o caso do estacionamento

6.6 CONTROLE ADICIONAL DO FLUXO DE VATs

Para situações em que o sistema de transporte baseado em VATs integra sistemas de grande flexibilidade, conforme o exemplo em estudo, é conveniente adotar-se uma técnica que evite falhas inesperadas no sistema ("deadlock") em

virtude de um gerenciamento incorreto do fluxo de materiais presente no sistema. Neste sentido, a partir do trabalho desenvolvido em YOSHIDA (1988), utiliza-se uma técnica que avalia de forma sistemática todas as possíveis ocorrências de "deadlock" no sistema, causado pelo fluxo de materiais.

Desta forma, a partir dos resultados obtidos, são estabelecidas regras adicionais de controle que evitam que o sistema atinja estes estados indesejáveis.

Para a definição das estratégias de controle de prevenção do "deadlock" é aplicado um procedimento baseado em cinco etapas fundamentais:

- (1) Definição de um modelo conceitual de "buffer";
- (2) Definição do estado de "deadlock";
- (3) Detecção dos possíveis estados de "deadlock";
- (4) Detecção do estado anterior ao "deadlock" e;
- (5) Solução do "deadlock".

A seguir, é explicado em detalhes as várias etapas deste procedimento, incluindo a especificação das estratégias de controle em E-MFG para o caso do exemplo em estudo.

6.6.1 UM MODELO CONCEITUAL PARA O CONTROLE DO FLUXO DE MATERIAIS

Como hipótese básica, supõe-se que o sistema produtivo é formada por várias estações de trabalho que possuem um magazine de entrada e outro de saída - para a armazenagem temporária das peças em trânsito - e uma unidade de processamento destas peças, conforme o exemplo apresentado.

Para evitar-se a situação de "deadlock" representada pela Fig. 2.8 (Capítulo 2), o controle da seqüência de operações deve adicionar condições de controle que

vincule a operação <retirar uma peça do magazine de entrada para ser processada> à condição <o magazine de saída não está completo>.

Para que estes elementos sejam modelados de forma consistente, é necessário estabelecer um modelo conceitual que corresponde a um "box" virtual para controlar o fluxo de entrada e saída de peças em cada estação.

Neste sentido, utiliza-se um "box" capacidade virtual - com capacidade igual à do magazine de entrada - denominado *CONTin* que representa a função de *contar* as peças contidas no magazine de entrada, incluindo a peça que está sendo transportada por um VAT para ser armazenada neste magazine e posteriormente processada nesta estação. A Figura 6.16 representa este modelo em E-MFG/PFS (N representa a capacidade dos "boxes").

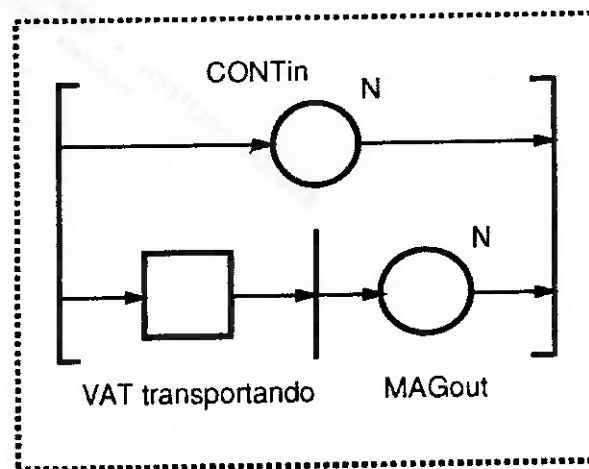
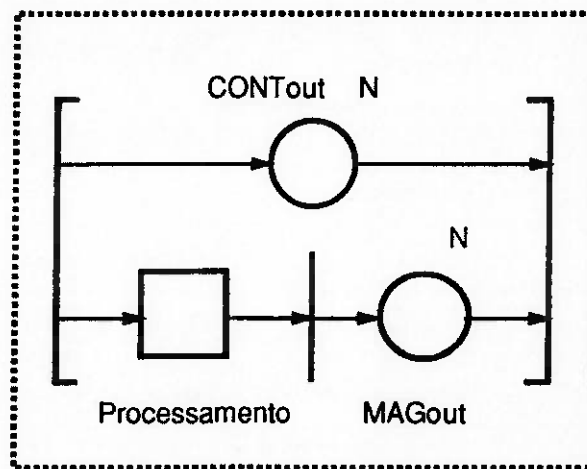


Fig. 6.16 Modelo do "box" virtual *CONTin*

De forma similar, utiliza-se o "box" virtual *CONTout* - com capacidade igual à do magazine de saída - para representar a *contagem* das peças depositadas no magazine de saída, incluindo a peça que está sendo processada. A Figura 6.17 representa este modelo em E-MFG/PFS (N representa a capacidade dos "boxes").

Fig. 6.17 Modelo do "box" virtual *CONTout*

6.6.2 DEFINIÇÃO DO ESTADO DE "DEADLOCK"

Interpretando-se o modelo do fluxo de materiais proposto na secção anterior, conclui-se alguns fatos importantes:

- esta estratégia impede que a capacidade dos magazines sejam ultrapassadas por novas peças que estejam sendo transportadas (*CONTin*) ou por peças que estejam sendo processadas (*CONTout*);
- com certeza a carga e descarga de peças na unidade de produção é do tipo FIFO (segue a seqüência normal de operação);
- a evolução de uma marca contida no *CONTout* de uma estação para o *CONTin* da próxima estação corresponde ao instante de definição do transporte¹. Portanto, apenas um produto é movimentado por vez no modelo conceitual (neste modelo o movimento do produto entre as estações ocorre instantaneamente, em virtude das condições <produto à espera do VAT> e <produto sendo transportado> serem englobadas pelo modelo *CONTin*, pois o objetivo neste nível de abstração é

¹No Capítulo 3 discute-se o problema de simultaneidade de eventos. Este conceito pode ser aplicado no presente caso

apenas considerar que um produto será transportado para o magazine de entrada).

Baseado nestas considerações, a possibilidade de ocorrência de "deadlock" em virtude do fluxo de materiais restringe-se à seguinte situação: corresponde ao estado do sistema em que pelo menos uma estação de trabalho encontra-se na situação em que o número de marcas (correspondentes às peças) no "box" *CONTin* e no "box" *CONTout* é igual ao limite máximo de capacidade de cada um deles - isto é, estão completos - e o primeiro produto a sair do magazine de saída não pode ser transportado para a estação correspondente à próxima operação.

Se o sistema atingir este estado, estará em "deadlock".

6.6.3 DETECÇÃO DO ESTADO DE "DEADLOCK"

De acordo com o conceito de "deadlock" descrito anteriormente, uma das formas de prever todas as possibilidades de ocorrência de "deadlock" desta natureza, consistente na análise de grafos transição [YOSHIDA (1988)].

Os grafos transição são constituídos por dois elementos fundamentais:

- lugares, representados por círculos e;
- arcos orientados.

Os lugares admitem inscrições e representam as estações de processamento e as estações de estoque correspondentes à origem e destino das encomendas.

Os arcos orientados são utilizados para conectar os lugares de forma sistemática - sempre deve existir pelo menos um arco orientado entre dois lugares adjacentes - e as inscrições nestes arcos representam o fluxo de cada material.

Para a construção destes grafos é possível realizar as seguintes simplificações:

- se houver mais de um arco no mesmo sentido unindo os mesmos lugares, utiliza-se o conectivo *ou* para compor as inscrições em um único arco e;
- se houver mais de uma visita de uma mesma peça em uma mesma estação, é necessário distinguir este fluxo a partir de inscrições diferentes².

Para a construção do grafo transição do sistema de manufatura descrito na Figura 6.1, representa-se, paulatinamente, as estações, através de lugares, e os fluxos de materiais associados aos produtos. A Figura 6.18 ilustra o grafo transição obtido.

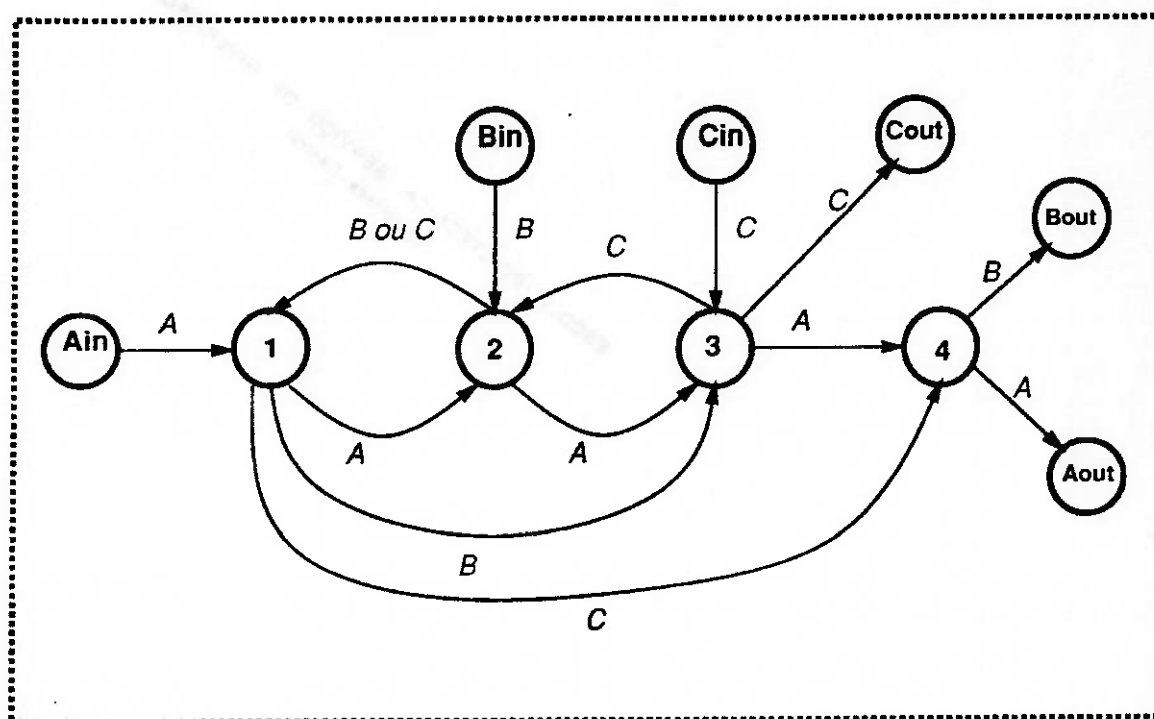


Fig. 6.18 Grafo transição do sistema em estudo

Segundo YOSHIDA (1988), os possíveis casos de "deadlock" em um sistema estão associados à presença de ciclos fechados no grafo transição.

Uma vez que os grafos transição permitem a abstração do tempo para a representação do fluxo de materiais, torna-se uma ferramenta adequada para

²Este procedimento é útil para a identificação de ciclos fechados no grafo.

representar os possíveis estados que o sistema produtivo pode alcançar, em função do transporte de produtos realizado. Neste contexto, se houver uma determinada seqüência de processamento dos produtos, que estabelece um ciclo fechado em termos de fluxo de materiais entre as estações, esta situação pode corresponder a um estado de "deadlock", no caso de haver um maior fluxo de entrada de itens quando comparado ao fluxo de saída.

Desta forma, em termos de grafo transição, é possível caracterizar o estado de "deadlock" em um sistema produtivo se, em pelo menos um dos ciclos contidos neste grafo, verificam-se as seguintes condições:

- O *CONTin* e o *CONTout* de todas as estações que formam o ciclo estão completas (no limite máximo) e;
- O primeiro produto do magazine de saída de cada estação do ciclo corresponde ao produto inscrito sobre os arcos orientados que saem da mesma.

Voltando-se ao sistema de manufatura em estudo, extraindo-se todos os ciclos do grafo transição da Fig. 6.18, obtêm-se os ciclos representados na Fig. 6.19. Portanto, caso se verifiquem em algum destes ciclos as condições descritas acima, caracteriza-se o estado de "deadlock" do sistema.

6.6.4 DETECÇÃO DO ESTADO ANTERIOR AO "DEADLOCK"

A partir da definição de "deadlock" apresentada na secção anterior, se houver a presença de ciclos no grafo transição, baseado na hipótese de que o *CONTout* atinge sua capacidade máximo antes do *CONTin*, define-se como *estado anterior ao "deadlock"* do sistema a situação em que se verifica as seguintes condições em pelo menos um dos ciclos:

- O *CONTout* de todas as estações do ciclo estão completos (capacidade máxima);
- O primeiro produto do magazine de saída de cada estação corresponde ao produto especificado nos arcos orientados do grafo transição e;
- Existe apenas um "box" *CONTin* que não está completo e neste caso, há apenas um vazio disponível para uma marca.

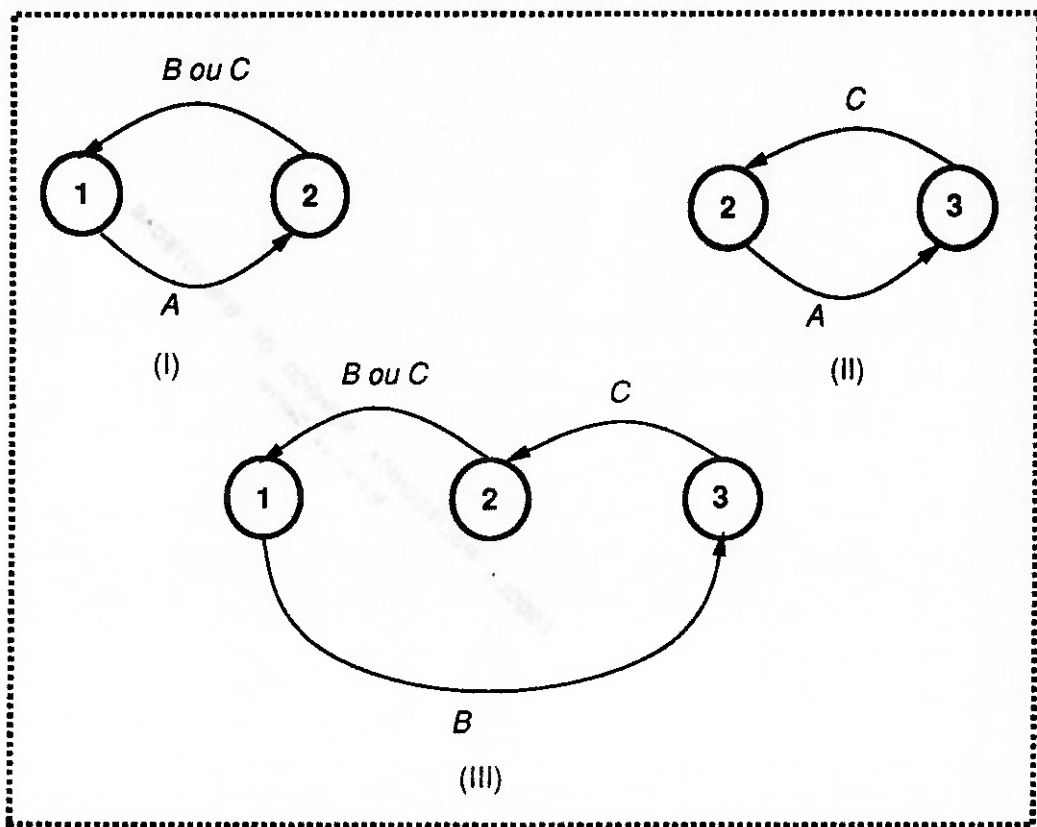


Fig. 6.19 Ciclos extraídos do grafo transição

Desta forma, se um sistema está no *estado anterior ao "deadlock"* e, se for transportado um produto de uma determinada estação para o único magazine de entrada que possui um vazio no ciclo e esta estação não pertence a este ciclo, o sistema entra em estado de "deadlock".

6.6.5 SOLUÇÃO DO "DEADLOCK"

Prova-se que se um sistema atinge o estado anterior ao "deadlock", para cada um dos ciclos em que se verifica esta condição, é necessário transportar um produto proveniente de um magazine de saída que pertença ao ciclo para o único vazio disponível em *CONTin*. Desta forma, evita-se o "deadlock".

Em YOSHIDA (1988) este método é apresentado de forma clara e minuciosa e o resultado destas investigações estabelece a seguinte conclusão: é impossível que o movimento de um produto em um ciclo que está no estado anterior ao "deadlock" provoque o "deadlock" em outro ciclo.

Portanto, uma vez que para o sistema atingir o estado de "deadlock" precisa atingir primeiro o estado anterior ao "deadlock", alcançado este estado em um determinado ciclo, é possível evitar-se o "deadlock" através do movimento do produto no próprio ciclo. Observado-se que o movimento deste produto não causa o "deadlock" em outros ciclos, evita-se o "deadlock" global do sistema de forma consistente.

6.6.6 ESPECIFICAÇÃO DO CONTROLE EM E-MFG

Para especificar-se as estratégias de controle que evitam o "deadlock" é necessário representar as seguintes características:

- a condição de que há apenas um vazio no *CONTin*;
- a especificação do tipo de produto que será o primeiro a ser retirado do magazine de saída e;
- a especificação das restrições adicionais de disparo que garantem a manutenção do fluxo de materiais em ciclos que atingem o *estado anterior ao "deadlock"*.

A representação da condição em que há apenas um vazio no *CONTin* pode ser descrita a partir do modelo proposto na Figura 6.20. O "box" *U.CONTin* é de capacidade unitária enquanto o "box" *N-1.CONTin* é de capacidade N-1. Desta forma, a detecção do estado <"box" *N-1.CONTin* cheio e "box" *U.CONTin* sem marca > corresponde a situação em que há apenas um vazio no "box" *CONTin*.

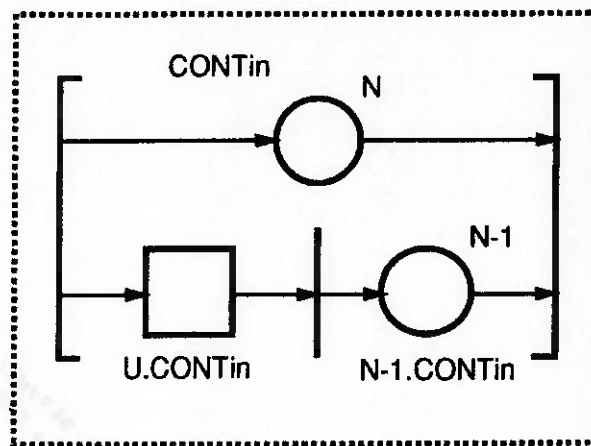


Fig. 6.20 Representação do estado do box *CONTin*

Para a especificação do tipo de produto que será o primeiro a ser retirado do magazine de saída utiliza-se um modelo semelhante ao anterior, descrito na Figura 6.21.

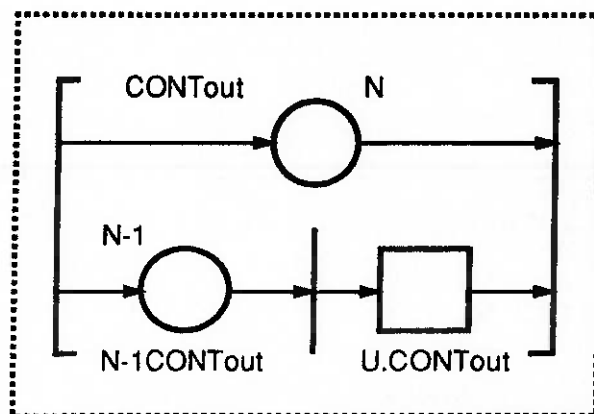


Fig. 6.21 Detecção do tipo de produto

Neste modelo, o "box" *U.CONTout* permite a detecção dos atributos da marca que representa a especificação do primeiro produto a ser retirado do magazine de saída.

Quanto à especificação das restrições adicionais de disparo convém adotar-se uma abordagem sistemática do problema. Neste sentido, esta tarefa pode ser decomposta em três etapas fundamentais:

- (a) inspeção do grafo transição para a extração dos ciclos existentes;
- (b) representação da *matriz de estados anteriores ao "deadlock"*;
- (c) representação da *matriz de controle das transições* e
- (d) incorporação das restrições adicionais de disparo às transições adequadas através de funções lógicas.

A partir da inspeção do grafo transição para a extração dos ciclos existentes, é construída a matriz de estados anteriores ao "deadlock" da seguinte forma:

- cada linha corresponde à verificação do estado anterior ao "deadlock" em um ciclo, considerando a existência de um vazio em uma determinada estação *e*;
- cada coluna corresponde ao estado dos "boxes" *U.CONTin*, *N-1.CONTin*, *N-1.CONTout* e *U.CONTout* de cada estação presentes nos respectivos ciclos.

Nesta matriz, cada um dos elementos a_{kl} (*k* corresponde à linha e *l* corresponde à coluna) é codificado da seguinte forma:

- $a_{kl} = \langle U.CONTinl/N-1.CONTinl/N-1.CONToutl/U.CONToutl \rangle$, onde
- *U.CONTinl* representa a presença ou não de um item no vazio da estação *l*: se *U.CONTinl* = 1 então há um item. Se *U.CONTinl* = 0, não há um item;
- *N-1.CONTinl* indica o estado deste elemento armazenador: se *N-1.CONTinl* = *F* então este elemento está completo, com sua capacidade máxima;
- *N-1.CONToutl* é codificado de forma equivalente ao *N-1.CONTinl*;

- U.CONTOutl especifica o tipo de produto contido nele. No caso exemplo em estudo especifica-se os produtos por A, B ou C.

O índice k refere-se ao ciclo que esta sendo verificado. Para o exemplo em estudo adotou-se a seguinte codificação:

- K = 1: verifica o ciclo (I) para o caso em que existe um vazio na estação 1;
- K = 2: verifica o ciclo (I) para o caso em que existe um vazio na estação 2;
- K = 3: verifica o ciclo (II) para o caso em que existe um vazio na estação 2;
- K = 4: verifica o ciclo (II) para o caso em que existe um vazio na estação 3;
- K = 5: verifica o ciclo (III) para o caso em que existe um vazio na estação 1;
- K = 6: verifica o ciclo (III) para o caso em que existe um vazio na estação 2;
- K = 7: verifica o ciclo (III) para o caso em que existe um vazio na estação 3;

A Figura 6.22 representa a matriz obtida para o sistema em estudo. Quando a estação não faz parter do ciclo, associa-se o símbolo "-" ao elemento correspondente da matriz.

0/F/F/A	1/F/F/BvC	-	-
1/F/F/A	0/F/F/BvC	-	-
-	0/F/F/A	1/F/F/C	-
-	1/F/F/A	0/F/F/C	-
0/F/F/B	1/F/F/BvC	1/F/F/C	-
1/F/F/B	0/F/F/BvC	1/F/F/C	-
1/F/F/B	1/F/F/BvC	0/F/F/C	-

Obs.: "v" = "ou"

Fig. 6.22 A matriz de estados anteriores ao "deadlock"

A Figura 6.23 exemplifica o modelo E-MFG do controle da seqüência de operações de cada produto, para o caso do sistema em estudo, incluindo-se os elementos conceituais para a representação das regras adicionais de controle. Neste modelo, descreve-se o fluxo do *produto A* correspondente à seguinte situação: a transição t_{A1} indica o evento que determina a solicitação de um VAT, por parte da estação de entrada EST.in, no sentido de transportar material para a estação de processamento EST.1. Por sua vez, a transição t_{A2} corresponde ao evento que determina a solicitação de um VAT para o transporte do produto A, já processado, para a estação de processamento EST.2, correspondente à próxima etapa da seqüência de operações do produto A.

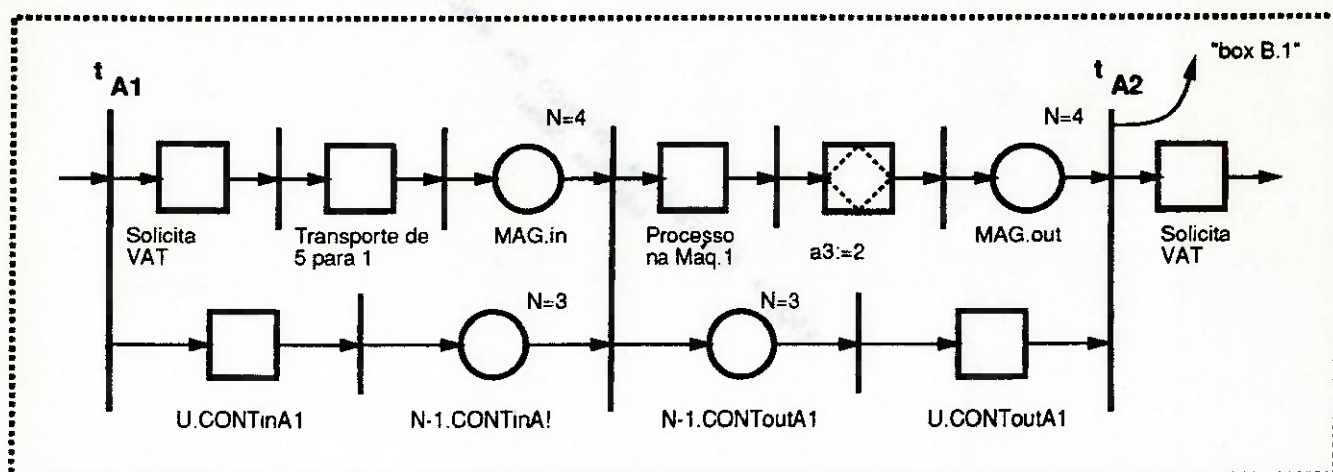


Fig. 6.23 Exemplificação do modelo E-MFG com os elementos adicionais de controle

Finalizando, para associar-se adequadamente as condições adicionais de controle às transições correspondentes, constroe-se a matriz de controle das transições, conforme ilustra a Fig. 6.24, para o caso do exemplo proposto.

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}$$

Fig. 6.24 A matriz de controle das transições

Nesta matriz, as linhas correspondem aos vários ciclos, obedecendo a mesma codificação proposta anteriormente, e as colunas correspondem às várias transições vinculadas com a entrada do fluxo de materiais nas diversas estações. Desta forma, codificou-se as colunas da seguinte maneira:

- coluna 1: transição tA1 que corresponde à estrada do produto A para ser processado na estação 1;
- coluna 2: transição tA2 que corresponde à estrada do produto A para ser processado na estação 2;
- coluna 3: transição tA3 que corresponde à estrada do produto A para ser processado na estação 3;
- coluna 4: transição tA4 que corresponde à estrada do produto A para ser processado na estação 4;
- coluna 5: transição tB2 que corresponde à estrada do produto B para ser processado na estação 2;

- coluna 6: transição tB1 que corresponde à estrada do produto B para ser processado na estação 1;
- coluna 7: transição tB3 que corresponde à estrada do produto A para ser processado na estação 3;
- coluna 8: transição tC3 que corresponde à estrada do produto C para ser processado na estação 3;
- coluna 9: transição tC2 que corresponde à estrada do produto C para ser processado na estação 2;
- coluna 10: transição tC1 que corresponde à estrada do produto C para ser processado na estação 1;
- coluna 11: transição tC4 que corresponde à estrada do produto C para ser processado na estação 4.

Os elementos desta matriz podem ser representados por dois valores:

- $a_{kj} = 0$ se a transição t_j não está vinculada à entrada de produtos externos ao ciclo k e;
- $a_{kj} = 1$ se a transição t_j relaciona-se à entrada de produtos externos ao ciclo k .

A partir das informações contidas nestas matrizes, obtêm-se um conjunto de regras consistentes para inibir as transições adequadas no sentido de evitar as situações de "deadlock", conforme previsto anteriormente.

Capítulo 7

OBSERVAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia consistente e adequada para a modelagem e controle de sistemas de manufatura, condizente com o grau de flexibilidade pertinente a estes sistemas.

Neste sentido, como ponto de partida, realiza-se uma investigação referente ao comportamento dinâmico destes sistemas, caracterizados como uma classe de Sistemas de Eventos Discretos - SEDs. A partir dos resultados levantados, procura-se estabelecer uma organização estrutural modular para estes sistemas produtivos dirigidos por eventos, de forma sistemática. Desta maneira, é apresentado o conceito de Sistemas Integrados de Manufatura - SIMs - e sua relação com Sistemas Antropocêntricos.

Para a descrição do comportamento dinâmico destes sistemas, investiga-se as técnicas derivadas de Redes de Petri, baseadas em Mark Flow Graph - MFG - e Production Flow Schema - PFS. Apresenta-se os conceitos fundamentais relativos aos princípios e características do MFG, descrevendo seus elementos estruturais e suas inter-relações. No sentido de mostrar a evolução do MFG como técnica de modelagem e especificação do controle de sistemas dirigidos por eventos, apresenta-se o MFG Funcional como resultado de um processo de modularização

para a simplificação do processo de modelagem. Estendendo a aplicação do MFG para a modelagem de sistemas de manufatura, apresenta-se a metodologia MFG/PFS baseada em uma abordagem hierárquica para uma modelagem sistemática de sistemas produtivos, capaz de gerar uma interpretação para o modelo MFG.

Apresentada as técnicas de modelagem baseadas em MFG, realiza-se uma explanação a respeito da capacidade de modelagem do MFG funcional e sua adequação para a representação dos níveis de flexibilidade de um sistema. Neste contexto, propõe-se extensões ao MFG que fortaleçam o poder de representação do comportamento dinâmico de sistemas complexos que apresentam maior grau de flexibilidade. Desta forma, é proposto o Mark Flow Graph Estendido baseado em marcas individuais com atributos e transições com regras adicionais de disparo incorporadas.

Para orientar de forma sistemática o processo de modelagem e especificação de controle baseado em E-MFG, propõe-se uma extensão à metodologia MFG/PFS, no sentido de permitir uma descrição hierárquica dos atributos, a partir de um modelo conceitual, e uma especificação hierárquica do controle dos sistemas de manufatura.

Para mostrar o poder de modelagem da ferramenta proposta, aplica-se a metodologia E-MFG/PFS para a descrição de um sistema de manufatura com elevado grau de flexibilidade, composto por estações de trabalho e um sistema de transporte baseado em veículos autônomos - VATs. Investigando-se o problema do controle do fluxo de VATs em sistemas com esta flexibilidade, aplicou-se uma técnica que evita que o sistema entre em estado de "deadlock" em virtude de problemas de supervisão do fluxo de materiais pertinentes ao processo produtivo. Novamente, foi possível verificar a flexibilidade da ferramenta para especificar as regras de controle adicionais necessárias para evitar o "deadlock".

Neste contexto, este trabalho procura contribuir no sentido de propor ferramentas para a especificação do comportamento dinâmico e controle de SIMs, ao mesmo tempo em que faz emergir uma variedade de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos, baseados nesta ferramenta.

Primeiramente, para uma aplicação desta ferramenta é necessário desenvolver-se um simulador baseado em E-MFG, de fundamental importância para a validação de modelos E-MFG realizados. Neste contexto, é possível desenvolver-se um interpretador adequado para a aplicação sistemática da metodologia E-MFG/PFS verificando os vários procedimentos necessários para uma especificação adequada e consistente do controle de sistemas de manufatura. Neste escopo, no sentido de planejar-se um ambiente integrado para o projeto de sistemas de manufatura, é fundamental a investigação relacionada ao desenvolvimento de controladores baseados em E-MFG, considerando-se aspectos relativos à proposta de arquiteturas e máquinas E-MFG.

Estas observações condizem com as necessidades de desenvolver-se sistemas de apoio para o desenvolvimento de SIMs e estão de acordo com a tendência notória de adotar-se técnicas gráficas, principalmente derivadas de Redes de Petri, para a modelagem e controle destes sistemas.

REFERÊNCIAS

- ANNBORN, M. The factory of the future. In: Warnecke H.-J. (e..), Proceedings of the 3rd International Conf. on Flexible Manufacturing Systems and 17th Annual IPA Conf., IFS (Publications) and North Holland, England, 1984.
- ASFAHL, C.R. **Robots and Manufacturing Automation**, John Wiley & Sons, Inc, USA, 1985.
- BAKO, B. et al., Implantação de um sistema de regras de produção controlado para a aplicação na supervisão de sistemas flexíveis de manufatura. In: 4º CONAI. Anais. Brazil, 1990, p.164-173.
- BARAD, M. e SIPPER, D. Flexibility in manufacturing systems: definitions and Petri net modelling. **Int. Journal Prod. Res.**, Vol.26, nº2, pp.237-248, 1988.
- BEL, G. et al. Flexible Manufacturing Systems: Modelling and Simulation. **Systems & Control: Encyclopedia, Theory, Technology, Application**, 1988, p. 1642-49.
- BRAND, K.P. e KOPAINSKY, J. Principles and Engeneering of Process Control with Petri Nets, **IEEE Trans. on Automatic Control**, v.33, n.2, p.138-49, 1988.
- CAO, X.R. e HO, Y.C. Models of Discrete Event Dynamic Systems, **IEEE Control Systems Magazine**, v.10, nº4, p.69-76, 1990.
- CASSANDRAS, C. G. e RAMADGE, P.J. Toward a Control Theory for Discrete Event Systems. **IEEE Control Systems Magazine**, v.10, n.4, p.66-8, 1990.
- DAVIES, B.J. Implication of the human factors in control and programming of FMS. In Rathmill, K. **Control and Programming in Advanced Manufacturing**. IFS (Publications) Ltd, UK, Springer-Verlag, 1988, p.133-42.

- Fuji Electric & Fuji-FACOM Control, Material Flow System Control (Fi-net). **Journal Of the Society of Instrument and Control Engineers**, v.28, n.9, p.826-7, Tokyo, Japan, 1989.
- GROOVER, M.P. **Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing**, Prentice-Hall International Editions, USA, 1987.
- GROSSESCHALLAU, W. **Materials Handling and Logistics - Demands for Efficiency and Flexibility**. In Kusiak, A. **Modelling and Design of Manufacturing Systems**, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1986, p.67-80.
- HASEGAWA, K. et.al., **Proposal of Mark Flow Graph for Discrete System Control**, **Trans. of SICE**, Tokyo, v.20, n.2, p.122-129, 1984.
- HASEGAWA, K. e TAKAHASHI, K. **Simulation of Discrete Production Systems Based on Mark Flow Graph**. **System Science**, Wroclaw, V.13, nº1-2, 1987.
- HILL, F, e PETERSOSN, G. **Introduction to Switching Theory and Logical Design**, John Wiley & Sons, 1968.
- HO, Y.C. **Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems**. In **IEEE. Proc.** 1989, v.77, p.3-6.
- IEE-Japan. **Sequential Control Engineering: New Theory and Design Method**. Tóquio, Japão, Ohm Publ., 1988 (em japonês).
- ITO, Y. **Conceptualizing the Future Factory System**. **Manufacturing Review**, v.1, n.4, 1988.
- ITO, Y. **A desirable production structure looking toward the 21st century - Anthropocentric Intelligence-Based Manufacturing**. In: XI COBEM. **Anais**. Brazil, S. Paulo, 1991, p.23-32.
- MENENDEZ, C. e KÜNZLE, L.A. **Controle de Sistemas Flexíveis de Manufatura: uma Abordagem Estruturada**. In: 1º Encontro Regional de Automação e Instrumentação. **Anais**. Vitória, 1989, p.19-29.

- KÜNZLE, L.A.** Controle de Sistemas Flexíveis de Manufatura - Especificação dos Níveis Equipamento e Estação de Trabalho. Curitiba, 1990. 270p. Dissertação (Mestrado) - CEFET.
- KUSIAK, A.** Parts and Tools Handling Systems. In Kusiak, A. *Modelling and Desing of Manufacturing Systems*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1986, p.99-109.
- KUSIAK, A. e CHOW, W.S.** Decomposition of Manufacturing Systems, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, v.4, n.5, 457-71, 1988.
- LEUNG, Y.L. E SURI, R.** Performance Evaluation of Discrete Manufacturing Systems, *IEEE Control Systems Magazine*, v.10, n.4, p.77-86, 1990.
- MASUDA R. e HASEGAWA, K.** Mark Flow Graph and its application to complex sequential control system,. In: 13th Hawaii Int. Conf. System Science. Proc. 1980, p.194-203.
- MYIAGI, P.E.** A Study on MFG based Programming Method for Robots, Tokyo Institute of Technology, Tese de Mestrado, Japan, 1985.
- MYIAGI, P.E.** Control System Design, Programming and Implementation for Discrete Event Production Systems by Using Mark Flow Graph, Tokyo Institute of Technology, Tese de Doutorado, Japan, 1988.
- MIYAGI, P.E. & FURUKAWA, C.M.** MARK FLOW GRAPH E PRODUCTION FLOW SCHEMA: UNIFICAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE. In 3º CONAI, São Paulo, 1988. *Anais. São Paulo*, 1988. v.1, p.257-64.
- MIYAGI, P. E. et al.** Sistema de Manufatura: Tendências em Modelagem, Análise e projeto. In: X COBEM. *Anais. Rio de Janeiro*, 1989.
- PETERSON, J.L.,** Petri Net Theory and the Modeling of Systems, Prentice-Hall, 1981.
- REISIG, W.** Petri Nets an Introduction, Springer-Verlag, New York, 1985.

- REISIG, W. A Primer in Petri Net Design, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.**
- SAHRAOUI, A. et al. Joining Petri Nets and Knowledge Based Systems for Monitoring Purposes. In: Int. Conf. on Robotics and Automation. Proc. USA, 1987.**
- SANTOS F^o, D.J. & MIYAGI, P.E. Sistemas de Eventos Discretos e seu Controle. In: 1^o COBISA/CINISA, São Paulo, 1991. Anais. ISA INTERNACIONAL, 1991. p.2.1-2.12.**
- SILVA, M. Las Redes de Petri: in la Automática y la Informática, Editorial AC, Madrid, 1986.**
- STONE, H.S. Discrete Mathematical Structures and Their Applications. SRA, 1973.**
- TAKAHASHI, K. e HASEGAWA, K. Proposal of Tagged Mark Flow Graph for Flexible Manufacturing Systems. In: 30th Joint conf. of JAACE. Proc. Osaka, 1987, p.453-6.**
- VALLETE, R., Nets in production systems, Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, p.191-217, 1986.**
- VALLETE, R. et al. Petri Nets and Production Rules for Decision Levels in FMS Control. In: 12th IMACS World Congress on Scientific Computation. Proc. Paris, 1988, p.522-4.**
- VALLETE, R. e SILVA, M. A Rede de Petri: uma ferramenta para a automação fabril. In: 4^o Congresso Nacional de Automação Industrial. Anais. São Paulo, 1990.**

VISHWANADHAM, N. e NARAHARI, Y., Coloured Petri Nets Models for Automated Manufacturing Systems. In: IEEE Robotics and Automation Conference. Proc.. Raleigh, North Carolina, 1987, p.1985-90.

YOSHIDA, S. Tagged MFG Based Control Of Materials Flow in Job-Shop Production Systems, Dissertação de Mestrado, Tokyo Institute of Technology, Japan, 1988.