

ADINAN DE SOUZA

**MÉTODO DE MODELAGEM E ANÁLISE DE SISTEMAS DE
MANUFATURA BASEADO NO MODELO DOS RECURSOS E
NO MODELO FUNCIONAL**

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

São Paulo
2000

**MÉTODO DE MODELAGEM E ANÁLISE DE SISTEMAS DE
MANUFATURA BASEADO NO MODELO DOS RECURSOS E
NO MODELO FUNCIONAL**

ADINAN DE SOUZA

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

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica - Mecatrônica

Orientador:

Lucas Antonio Moscato

São Paulo
2000

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Aquellos que amo

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato pela orientação e suporte ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho pela supervisão e colaboração intensa.

Ao Prof. Dr. José Reinaldo Silva e ao Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barreto pelas diversas discussões levadas ao longo deste trabalho.

Ao Eng. Alfio Giusti, gerente da AP31.

Aos amigos da pós-graduação da Mecatrônica: Walter de Brito Vidal Filho,

Pedro Gonzalez del Foyo, Fernando Baccanelli, Emilia Villani, Fabrício Junqueira,

José Roberto Vieira, Silvana A. G. Silva, Gladys Batista, Melquisedec Santos, Fábio

Magalhães, Luciano Menegaldo, Fernando Freitas, Walter Assmann, e muitos

outros, que com seu companheirismo proporcionaram motivação para vencer os

desafios.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

pelo financiamento parcial deste trabalho.

SUMÁRIO

VIII	LISTA DE FIGURAS
XI	LISTA DE SÍMBOLOS
XV	RESUMO
XVI	ABSTRACT
1	1. INTRODUÇÃO
1	1.1. MOTIVAÇÃO
7	1.2. OBJETIVOS
8	1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO
10	2.1. INTRODUÇÃO
11	2.2. SISTEMAS DE MANUFATURA
11	2.2.1. DEFINIÇÃO DE MANUFATURA
12	2.2.2. SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEIS
13	2.2.3. ARQUITETURA DE UM SISTEMA DE MANUFATURA
15	2.2.4. OBJETO FÍSICO
16	2.2.5. PLANEJAMENTO DO PROCESSO
18	2.3. MODELAGEM DA MANUFATURA
18	2.3.1. REQUISITOS
20	2.3.2. REDES DE PETRI E SUAS MODIFICAÇÕES
22	2.3.3. PROPRIEDADES DA MANUFATURA MODELADAS POR REDES DE PETRI
23	2.3.4. MÉTODO PARA MODELAGEM DE SISTEMAS DE MANUFATURA
24	2.3.5. PROPRIEDADES DOS MODELOS EM REDES DE PETRI
26	2.3.6. MÉTODOS DE ANÁLISE DE MODELOS EM REDES DE PETRI
28	2.4. MÉTODOS BASEADOS EM REDES DE PETRI INTERPRETADAS
29	2.4.1. MARK FLOW GRAPH (MFG)
30	2.4.2. MARK FLOW GRAPH ESTENDIDO (E-MFG)
32	2.4.3. PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS)

83	5.2. MODELO A SER ESTUDADO.....
82	5.1. INTRODUÇÃO.....
82	5. ESTUDO DE CASO.....
80	4.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....
73	4.3.3. DEFININDO OS ELEMENTOS BASEADOS NOS DIAGRAMAS DE AUXÍLIO.....
68	4.3.2. DIAGRAMAS DE AUXÍLIO.....
67	4.3.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA BÁSICA DA REDE.....
66	4.3. GERAÇÃO DO MODELO DA MANUFATURA EM CPN.....
63	4.2.3. COMPORTAMENTO DA CPN.....
59	4.2.2. ESTRUTURA DA CPN.....
58	4.2.1. DEFINIÇÃO DE MULTI-SETS.....
58	4.2. REDES DE PETRI COLORIDAS OU (COLOURED PETRI NETS - CPN).....
57	4.1. INTRODUÇÃO.....
57	4. GERAÇÃO DOS MODELOS DA MANUFATURA EM CPN.....
56	3.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....
55	3.4.2. GERAÇÃO DOS MODELOS DA MANUFATURA.....
53	3.4.1. ELEMENTOS ASSOCIADOS ÀS MARCAS.....
52	3.4. MODELO DO SISTEMA DE MANUFATURA.....
47	3.3.2. OS MODELOS DOS PROCESSOS.....
43	3.3.1. MODELO DE RELACIONAMENTO ENTRE OS RECURSOS.....
43	3.3. MÉTODO DE MODELAGEM.....
42	3.2.2. FILOSOFIA DE MODELAGEM.....
39	3.2.1. O NOVO ENFOQUE NA MODELAGEM.....
39	3.2. FILOSOFIA DE MODELAGEM.....
38	3.1. INTRODUÇÃO.....
38	3. MÉTODO DE MODELAGEM PROPOSTO.....
36	2.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....
34	2.4.5. MÉTODO PORTO.....
33	2.4.4. MÉTODO PFS/MFG.....

126	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
125	7.3. TRABALHOS PUBLICADOS
123	7.2. TRABALHOS FUTUROS
121	7.1. CONCLUSÕES
121	7. CONCLUSÕES
120	6.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO
111	6.3. ESTUDO DE CASO
110	6.2.4. OBTENDO ETAPAS HABILITADAS
110	6.2.3. VETOR M_i E CÁLCULO DE $\tilde{Q}(P)$
110	6.2.2. CÁLCULO DE $K(P)$, A^- , A^+
109	6.2.1. ALGORITMO
109	6.2. MÉTODO DE GERAÇÃO E EVOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES
108	6.1. INTRODUÇÃO
108	6. MODELO ANALÍTICO DO SISTEMA DE MANUFATURA
106	5.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO
97	5.4. COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA DE MANUFATURA
94	5.3.3. DEFININDO ELEMENTOS BASEADOS NOS MODELOS DOS PROCESSOS
89	5.3.2. DIAGRAMAS DE AUXÍLIO
88	5.3.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA BÁSICA DA REDE
88	5.3. GERAÇÃO DO MODELO EM CPN
86	5.2.3. MODELOS DOS PROCESSOS
85	5.2.2. MODELO DE RELACIONAMENTO ENTRE OS RECURSOS
83	5.2.1. PROBLEMA

LISTA DE FIGURAS

11	Figura 2-1 Representação de um sistema produtivo (manufatura) [Palomino, 95].
14	Figura 2-2 Arquitetura de um Sistema de Manufatura Flexível.
17	Figura 2-3 Sequência para realização do planejamento do processo.
23	Figura 2-4 Modelos de operações: (a) seqüências, (b) concorrentes, (c) cíclicas, (d) alternativas e (e) compartilhamento de recursos [Zhou et. al., 95].
29	Figura 2-5 Elementos estruturais do MFG.
30	Figura 2-6 Exemplo de um modelo em MFG [Santos Filho, 93].
31	Figura 2-7 Exemplo de marca individual composta.
32	Figura 2-8 Exemplo de modelagem baseada em E-MFG [Santos Filho, 93].
33	Figura 2-9 Elementos do PFS.
34	Figura 2-10 Elementos estruturais do metodo Porto [Porto, 90].
35	Figura 2-11 Exemplo de um processo de fabricação [Porto, 90].
36	Figura 2-12 Exemplo do modelo detalhado do processo de fabricação.
39	Figura 3-1 Modelo, em MFG, de uma estação de trabalho compartilhando recursos para 2 processos.
41	Figura 3-2 Mudança no enfoque da sistemática de modelagem.
41	Figura 3-3 Sistema de manufatura composto por 1 BU, 1 MH e 2 MP.
42	Figura 3-4 Filosofia de modelagem do sistema de manufatura e do processo de fabricação.
44	Figura 3-5 Elementos associados aos lugares.
45	Figura 3-6 Elementos associados às transições.
48	Figura 3-7 Modelo de um processo em MFG.
49	Figura 3-8 - Modelo de processo com: a) op.; b) maq. resp. pela op.; c) op. e maq. responsável.

51 Figura 3-9 Exemplo de modelo do processo.....

53 Figura 3-10 Elementos do sistema de manufatura associados à marca.....

69 Figura 4-1 Diagrama modelo associando cores aos lugares, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).....

70 Figura 4-2 Diagrama com todas as relações de cores a lugares.....

72 Figura 4-3 Diagramas de associação de cores aos arcos, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).....

79 Figura 4-4 Exemplo de um diagrama "cor X arco".....

85 Figura 5-1 Sistema de manufatura composto por 1 BU, 1 MH e 2 MP.....

87 Figura 5-2 Modelos dos processos das peças PR1 e PR2 que ocorrem na estrutura de manufatura dado pelo modelo da Figura 5-1.....

88 Figura 5-3 Modelo contendo os elementos estruturais básicos do sistema de manufatura.....

89 Figura 5-4 Diagrama associando cores aos lugares, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo da peça PR1.....

90 Figura 5-5 Diagrama associando cores aos lugares referente ao processo da peça PR2.....

90 Figura 5-6 Diagrama associando cores aos lugares, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo da peça PR3.....

91 Figura 5-7 Diagrama completo de associação de cores aos lugares, no modelo do sistema de manufatura.....

92 Figura 5-8 Diagramas de associação de cores aos arcos, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).....

93 Figura 5-9 Diagramas de associação de cores aos arcos, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).....

93 Figura 5-10 Diagramas de associação de cores aos arcos, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).....

98 Figura 5-11 M₁ para o modelo contendo os elementos estruturais básicos do sistema de manufatura.....

99 Figura 5-12 M₂ para o disparo de $Y^{(BU-1, MH-1)}=E1$

100 Figura 5-13 M₃ para o disparo quando $Y^{(BU-1, MH-1)}=E3$

101 Figura 5-14 M_4 para o disparo quando $Y^{(MP-t, MH+t)} = op.1$

102 Figura 5-15 M_5 para o disparo quando $Y^{(BU-1, MH+t)} = E5$

103 Figura 5-16 M_6 para o disparo quando $Y^{(MP-t, MH+t)} = op.2$

104 Figura 5-17 M_7 para o disparo quando $Y^{(MP-t, MH+t)} = op.3$

105 Figura 5-18 M_8 para o disparo quando $Y^{(BU-1, MH+t)} = E6$

106 Figura 5-19 M_9 - marcação final, atingida com o disparo quando $Y^{(MP-t, MH+t)} = op.4$

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos lógicos e matemáticos

N	.....	Conjunto dos números naturais
n	.....	Um número natural qualquer
+	.....	Adição
\vee	.....	“e” lógico
\vee	.....	“ou” lógico
\cup	.....	União entre conjuntos
\cap	.....	Interseção entre conjuntos
|	.....	Tal que
\subseteq	.....	Contido
-	.....	Subtração
*	.....	Multiplicação escalar
\neq	.....	Diferente
$>$	.....	Maiores que
$<$	.....	Menor que
\leq	.....	Menor ou igual
=	.....	Igual
\exists	.....	Existe

∈	.....	Pertence
A	.....	Qualquer
Σ	.....	Somatória
→	.....	Implica
∅	.....	Conjunto vazio
X	.....	Produto cartesiano
<u>Demais símbolos:</u>		
Σ	.....	Conjunto finito de cores
A	.....	Conjunto finito de arcos
a	.....	Um arco qualquer
A ⁻	Matriz dos arcos de entrada
A ⁺	Matriz dos arcos de saída
AGV's	.....	Veículos Auto Guiados
BU	.....	Buffer
C (p)	.....	Conjunto finito de cores associada ao lugar p
c	.....	Uma cor qualquer
c ₁ , c ₂ , ... c _n	.....	Cores c ₁ , c ₂ , ... c _n
c _x , c _y , c _w	.....	Cores c _x , c _y , c _w
E1, E2, ... Ef	.....	Estados tecnológicos de uma peça
E (a), E(x ₁ , x ₂)	.....	Sentença expressa no arco a (x ₁ , x ₂)

G	.....Função de condução
In	.....Conjunto finito de arcos de entrada das transições
In($p_x, t, \text{In}(p_z, t)$)	.....Arcos de entrada de uma transição t
K (p)	.....Associa uma capacidade máxima de marcas a cada lugar
m	.....Multi-set
m(s)	.....Coeficiente do <i>multi-set</i>
M	.....Conjunto de todas as marcasões
M_i, M_1	.....Marcação inicial
M_1, M_2, \dots, M_{n+1}	.....Marcasões
MA	.....Elementos de Montagem de Materiais
MH	.....Manipulador de Materiais
MP	.....Processador de Materiais
MT	.....Transportador de Materiais
MS	.....Estocadores Automáticos de Materiais
N	.....Função n $^{\circ}$
Out	.....Conjunto finito de arcos de saída das transições
Out ($t, p_x, \text{Out}(t, p_z)$)	.....Arcos de saída de uma transição t
P	.....Conjunto finito de lugares
p	.....Um lugar qualquer
p_x, p_z, p_w	.....Lugares

PA	.....	Pallets
PR	.....	Pegás
PR ^{as}	.....	Pegás Montadas
Q (p)	.....	Quantidade de marcas existentes no lugar p
S	.....	Conjunto dos elementos para formar um <i>multi-set</i>
SED	.....	Sistemas a Eventos Discretos
T	.....	Transições
t	.....	Uma transição qualquer
TO	.....	Ferramentas
(x ₁ , x ₂)	.....	Arco formado pelos nós x ₁ e x ₂
Y	.....	Conjunto de todas as etapas
Y ₁ , Y ₂ , ..., Y _n	.....	Etapas Y ₁ , Y ₂ , ..., Y _{n-1}
Y	.....	Variável associada a um arco
Y ^(px, t) , Y ^(pz, t) , Y ^(pw, t)	.....	Variáveis associadas aos arcos (p _x , t), (p _z , t) e (p _w , t)

RESUMO

Atualmente, o mercado é caracterizado não apenas pela rápida mudança tecnológica mas também pela melhoria do gosto dos clientes, com aumento da demanda por variedade, e pela força da competição internacional. Isto implica em um perfil de produção de bens com grande variedade, lotes com volumes pequenos e alta qualidade dos produtos. Neste contexto, a complexidade dos sistemas automatizados aumenta, demandando novas formas de modelagem e análise. Sem as técnicas de modelagem e avaliação quantitativa é difícil prever o comportamento de um sistema de manufatura com a adequada precisão.

Neste trabalho, um novo método de modelagem é proposto, tratando separadamente a estrutura física (visão dos recursos) do sistema de manufatura e o plano do processo (visão funcional) com suas rotas de produção. O modelo dos recursos e os modelos dos processos são complementares, e estas diferentes partes são automaticamente fundidas para gerar um modelo completo do sistema de manufatura. O modelo completo do sistema de manufatura é uma Rede de Petri Colorida, e medidas de interesse podem ser obtidas do modelo através de análises numéricas ou por simulação.

ABSTRACT

Today's market is influenced not only by rapidly evolution technologies but also new customer requirements, with ever-increasing demand for variety, and by the power for international competition. This implies in high-variety, small batch products volume of high quality. In this context, the complexity of automated systems is increasing, demanding new ways for modelling and analysis. Without modelling and quantitative evaluation techniques it is often difficult to predict the behaviour of a manufacturing system with adequate accuracy.

In this work, a new modelling method for manufacturing systems is proposed, modelling separately the physical structure (resource view) of the manufacturing system and the process plan (functional view) with production routes. The resource model and the process models are complementary, and the different parts models are merged automatically to create a complete model of the manufacturing system. The complete model of the manufacturing system is a Coloured Petri Nets, date of interest can be obtained from the model by numerical analysis or simulation.

grande flexibilidade de todas as áreas de atividade. volumes e suporte o processamento de um elevada gama de produtos, exigindo contexto, há uma forte demanda por um perfil de empresa que produza em pequenos de sistemas de produção por encomendas ou por lotes e cada vez maior. Neste vida com os custos necessarios à sua diferenciação no mercado, assim, a exigência competição, passaram a necessitar de produtos que combinem pequenos ciclos de Em [Spur et. al., 95] observa-se que as empresas, a partir do aumento da

industrializados [Wu, 94][Valette et. al., 90][Palomino, 95]. um dos fatores principais de geração de riquezas nos países altamente através de linhas de produção do tipo *flow-shop* (ou produção em massa), tendo sido Até o final dos anos setenta, a automação fabril desenvolveu-se basicamente

1.1. MOTIVAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Neste novo paradigma da manufatura, a integração da empresa apresenta-se como uma excelente solução [Kosanke, 95] [Berio et. al, 95] [Costa et. al., 95]. Para tanto, é preciso que todos os elementos que a compõem - homens, máquinas, sistemas computacionais, entre outros - sejam capazes de trocar informações de maneira consistente [Amaral et. al., 99]. Um dos mecanismos que contribuem para gerar esta imagem integrada são os modelos.

Modelos, de uma forma genérica, são abstrações da realidade para esclarecer e gerenciar tarefas altamente complexas da empresa moderna em que se filtram detalhes irrelevantes e se representam as informações essenciais para realização de uma determinada tarefa. A modelagem das funções, serviços e processos são imprescindíveis para viabilizar e facilitar o processo de integração de uma empresa e, também, para melhorar o seu desempenho [Spur et al., 95].

Um conceito importante empregado amplamente na modelagem é a geração de diferentes visões (*views*), onde cada uma representa um aspecto parcial da realidade [Amaral et. al., 99][Bremmer, 95][Kosanke, 95]. Isto é feito para permitir o gerenciamento da complexidade que é uma organização. Assim, o modelo da empresa e da manufatura é desenvolvido através de um conjunto de representações complementares entre si, cada qual, abordando um aspecto.

O *framework* de modelagem CIMOSA (*Computer Integrated Manufacturing - Open System Architecture*), por exemplo, define a geração de pelo menos 4 diferentes visões: Funcional, Informações, Recursos e Organização [Kosanke, 95] [Zelm et. al., 95] [Vernadar, 93].

De acordo com a visão e o objetivo da modelagem diversos são os elementos que podem ser representados, tais como: processos, máquinas e recursos físicos, peças, informações, fluxo de materiais e a própria estrutura da organização.

Neste trabalho, os sistemas de manufatura são tratados de forma genérica, não procurando definir, em pormenores, a filosofia em que esta galgada sua política de integração e operacionalização, ou seja, se é tecnocêntrico [CIM, 90][Rehg, 92][Rembold, 94][Wu, 94], enxuto [Miyagi et. al., 99], antropocêntrico [Kovacs et. al., 95][Matsusaki, 98][Matsusaki et. al., 99][Santos Filho, 98], balanceado [Camarinha-Matos et. al., 95] ou holônico [Batochio et. al., 99][Franco et. al., 99]. Isto é possível ao considerá-los compostos por três objetos básicos: um físico (recursos e insumos), um de controle (lógica que determina seu comportamento) e um de informações (fonte de dados). Estes três objetos passam a ter grande importância na definição dos elementos que deverão compor os modelos.

Quanto a natureza de seu comportamento dinâmico, um sistema de manufatura pode ser considerado ou não um SED (Sistema a Eventos Discretos), de acordo com o nível de detalhamento de seu modelo [Valette et. al., 90]. Os SEDs possuem como característica básica a evolução dinâmica no tempo em função de interações entre os vários eventos discretos que ocorrem nesses sistemas.

Além de considerar a manufatura discreta como parte do escopo deste trabalho, a técnica e o método que serão propostos deverão possibilitar a modelagem de sistemas de manufatura com uma grande quantidade de pontos de decisão, ou seja, com capacidade de reprogramabilidade suficiente para atender a um perfil de produção do tipo peça a peça, onde pode não ocorrer grande semelhança na

seqüência de processos entre duas peças consecutivamente executadas. Um exemplo concreto ocorre quando, em uma mesma estrutura de manufatura, composta por uma quantidade limitada de máquinas, ocorrer o processamento consecutivo de peças distintas com planos de processos com pouca semelhança.

Além de permitir a modelagem do perfil de manufatura acima descrito é também necessária uma completa visualização tanto do objeto físico (recursos) como do fluxo de materiais (peças) por esta estrutura de manufatura, sem esquecer das características peculiares de cada recurso tais como sua capacidade e limitação.

Em [Cao et. al., 1990], tem-se uma visão global sobre os principais formalismos utilizados para a modelagem de SFDs. Dentre estes, as Redes de Petri apresentam-se como uma ferramenta adequada para contemplar os requisitos propostos, principalmente, por permitir a representação de operações concorrentes. Além desta, tem-se algumas outras características listadas abaixo:

- Sendo uma ferramenta gráfica e formal, fornecem um ambiente uniforme para a modelagem, análise e projeto para SFDs, e, particularmente, para sistemas de manufatura [Zhou et. al., 95][Valette et. al., 90];
- Seus modelos podem ser descritos por um conjunto de equações algébricas lineares, ou outro modelo matemático que reflita o comportamento do sistema [Zhou et. al., 95][Murata, 89][Jensen, 96];

• Permitem checar propriedades do modelo, tais como: relações de precedência, operações concorrentes, sincronização apropriada, alcançabilidade e *deadlock*, atividades repetitivas, mútua exclusão e compartilhamento de recursos;

- A validação dos modelos pode ser feita tanto pela análise matemática formal como por simulação. Na simulação, produz-se um conjunto de estados do sistema modelado, mostrando a presença (mas não a ausência) de erros no modelo, enquanto que na análise formal é possível gerar um modelo livre de erros, sendo este um de seus fatores diferenciais [Zhou et. al., 95];

- Sua aplicação para modelar e analisar sistemas de manufatura é bastante extensa, sendo utilizada para representar desde simples linhas de produção com *buffers* e máquinas até sistemas de produção automotivos, sistemas flexíveis de manufatura, linhas de montagem automatizadas [Zhou et. al., 95].

No contexto de modelagem de sistemas de manufatura, podem ser encontradas diversas aplicações, tais como modelamento de controladores de sequência [Murata, 95][Miyagi, 96][Santos Filho, 98][Santos Filho, 93], sequenciamento de tarefas [Souza et. al., 99], modelamento de processo de fabricação [Porto, 90][Inamasu, 95], modelamento de rotas de AGV's [Li et. al., 95]. Além disso, é possível analisar e medir o desempenho de sistemas de manufatura [Xing et. al., 95][Al-Jaar et. al., 90] [Banaszak et. al., 90] [Viswanadham et. al., 90] e obter o planejamento e o *scheduling* da manufatura [Proth et. al., 95][Lee et. al., 95][Haton et. al., 91].

As aplicações descritas acima, devido às diferentes visões inerentes, mostram que esta ferramenta é utilizada em praticamente todas as fases de desenvolvimento do projeto, desde a concepção e análise até a implementação e manutenção.

O amplo emprego das Redes de Petri na modelagem de sistemas de manufatura, conforme já verificado, é o fator principal que motiva o estudo desta

ferramenta em suas mais diversas aplicações, e, particularmente, para se propor um método para modelar a produção peça a peça, conforme se verifica nos objetivos

deste trabalho.

Dentre as aplicações, foram estudadas, em maiores detalhes, os métodos interpretados MFG, E-MFG, PFS e PFS/MFG, além do método Porto para o planejamento de processos. O termo interpretado vem do fato deles associarem, aos elementos estruturais das Redes de Petri, entidades próprias dos sistemas de manufatura. Estes métodos possuem uma abordagem funcional de modelagem, representando um sequenciamento de operações e atividades.

A solução para satisfazer os requisitos e objetivos propostos neste trabalho foi o desenvolvimento de duas visões complementares: uma dando a visão dos recursos e de seu relacionamento, utilizando para isto elementos do objeto físico (inspirada nos modelos interpretados), e outra dando uma visão funcional proporcionada pelos modelos dos planos de processos.

Sendo estas duas visões complementares, haveria, então, a necessidade de integrá-las para se obter uma completa e consistente representação do sistema de manufatura objeto de estudo e de seu fluxo de materiais (peças). O formalismo que viabiliza esta integração é dado pelas Redes de Petri Coloridas.

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

1. Desenvolvimento de um método para modelagem de sistemas de manufatura pela concepção da visão dos recursos e da visão funcional. Estas visões complementares geram o modelo completo do sistema de manufatura. A abordagem proposta pretende contemplar os seguintes requisitos:

- Ser simples de usar mesmo por aqueles que não são especialistas;
- Permitir que a produção peça a peça seja modelada de maneira consistente;
- Permitir a modelagem tanto do aspecto funcional (processos) como do relacionamento entre os diversos recursos físicos, determinando as possíveis rotas do fluxo de materiais;
- Gerar modelos facilmente interpretados.

2. Desenvolvimento de um método para gerar, a partir do modelo de relacionamento entre os recursos e dos modelos dos processos, o modelo de representação gráfica completa do sistema de manufatura em Redes de Petri Coloridas e outro para gerar, diretamente, as expressões algébricas que formalizam o modelo analítico completo do sistema de manufatura. Os modelos gerados servem de base para:

- Análises por simulação de sistemas de manufatura representando seu comportamento dinâmico e o fluxo de materiais, avaliando parâmetros como desempenho;

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

- Auxílio no desenvolvimento de sistemas produtivos;
- Futuros desenvolvimentos com adaptações mínimas;
- Geração de estratégia e lógica para sistemas de controle.

Capítulo 2: Conceitua-se manufatura, modelos e modelagem de sistemas de

manufatura por Redes de Petri. Apresenta-se as Redes de Petri Ordinárias e suas modificações, propriedades, métodos de análise e aplicações, assim como os métodos de modelagem da manufatura baseados em Redes de Petri interpretadas tais como o MFG, E-MFG, PFS, PFS/MFG e o Porto.

Capítulo 3: Propõe-se uma alternativa metodológica para a modelagem de

sistemas de manufatura, onde se desenvolve o modelo de relacionamento entre os recursos, proporcionando uma visão deles, e os modelos dos processos, proporcionando uma visão funcional. Estas duas visões complementares são, então, integradas, gerando o modelo do sistema de manufatura.

Capítulo 4: Apresenta-se um método para gerar o modelo gráfico completo

do sistema de manufatura em Redes de Petri Coloridas (*Coloured Petri Nets* - CPN). A sistemática consiste na definição dos elementos estruturais da CPN a partir do modelo de relacionamento entre os recursos e dos modelos dos processos.

Capítulo 5: Aplica-se, em um estudo de caso, o método para geração dos modelos gráficos em CPN, a partir do modelo dos recursos e dos modelos dos processos. Neste estudo de caso é também mostrado como seria o comportamento

dinâmico do sistema e definidas algumas hipóteses adotadas para evitar situações como o *deadlock* de fluxo de materiais.

Capítulo 6: Apresenta-se um método para gerar, diretamente, as expressões algébricas que formalizam o modelo analítico completo do sistema de manufatura, concebidos segundo a abordagem metodológica proposta no Capítulo 3. Este método é fundamental para validar analiticamente os modelos do sistema de manufatura e para o desenvolvimento de ferramentas e sistemas para análise. Neste capítulo, apresenta-se também a aplicação do modelo analítico no estudo de caso do Capítulo 5.

Capítulo 7: Sintetiza-se os principais tópicos deste trabalho e propõe-se trabalhos futuros. Discute-se a abordagem metodológica proposta no Capítulo 3 face aos requisitos de modelagem que devem ser contemplados e compara-se os métodos apresentados nos Capítulos 4 e 6 para geração do modelo completo do sistema de manufatura.

2. MODELAGEM DE SISTEMAS DE MANUFATURA

2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo contribui com uma revisão sistemática da literatura abrangendo a modelagem e análise de sistemas de manufatura baseadas em Redes de Petri.

Inicialmente, conceitua-se, de maneira abrangente, sistemas de manufatura, sua arquitetura básica e o planejamento e o plano de produção; em seguida, tem-se a definição das Redes de Petri Ordinárias, suas modificações, propriedades e métodos de análise. Por fim, apresenta-se os métodos interpretados - que associam elementos da manufatura a elementos estruturais das Redes de Petri - os quais são utilizados para, através de uma abordagem funcional, modelar os sistemas de manufatura.

2.2. SISTEMAS DE MANUFATURA

2.2.1. DEFINIÇÃO DE MANUFATURA

Segundo [Wu, 94], manufatura é a atividade organizada e dedicada para a

transformação de matéria prima em produtos. Durante esta transformação ocorre uma série de acréscimos de valores, pelos processos do sistema de manufatura, conforme

pode ser observado na Figura 2-1.

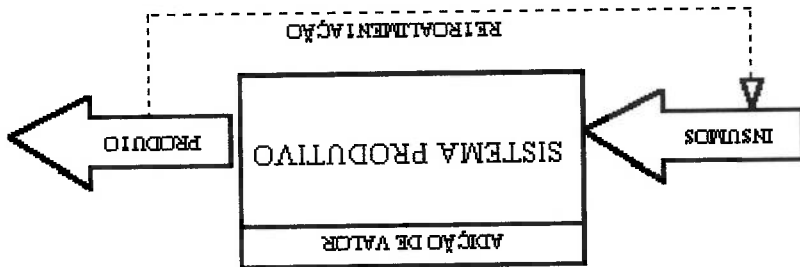


Figura 2-1 Representação de um sistema produtivo (manufatura) [Palomino, 95].

Os sistemas de manufatura podem ser estudados, segundo [Wu, 94], sob 4

perspectivas: funcional, estruturação hierárquica, tipo de sistema em um ambiente de

manufatura e análise de entradas (insumos) e saídas (produtos).

Em uma perspectiva funcional os componentes dos sistema de manufatura

podem ser identificados como insumos, processos (atividades), produtos, controle

realimentado e restrições.

A estruturação hierárquica pode dividir um sistema de manufatura em

diversos subsistemas, constituídos de todos os componentes, atributos e relações

necessárias para realização de um objetivo particular.

Sistemas de manufatura podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios: físico ou conceitual, estático ou dinâmico, contínuo ou discreto e estocástico ou determinístico [Wu, 94].

A análise de entrada-saída baseia-se na propriedade dos sistemas de manufatura que, em uma visão simplista, é composta por três componentes estruturais: insumos (entradas), processos e produtos (saídas). A análise envolve a identificação dos produtos do sistema para, em seguida, examinar os processos e insumos necessários à transformação.

2.2.2.SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEIS

Sistemas de Manufatura Flexíveis consistem de um grupo de estações de trabalho que são interconectadas por um sistema automatizado de fluxo de materiais (sistema de transporte), operando sobre um controle computadorizado (manipulação das informações) [Domeingts et. al., 93]. A extensa habilidade destes sistemas para reagirem às mudanças circunstanciais ocorridas nos sequenciamentos de produção e, principalmente, na estratégia de negócios da empresa é, então, chamada de flexibilidade [Costa et. al., 95].

Para fins de projeto, considera-se que sistema de manufatura flexível é composto por duas partes básicas: uma física, contendo os equipamentos de manufatura e um sistema de controle computadorizado contendo a lógica de operação do sistema [Silva et. al., 95].

A complexidade destes sistemas depende do tipo (número de máquinas) e de seu grau de flexibilidade, determinada pelas operações e atividades que podem ser

realizadas. Assim, quanto mais flexível for o sistema maior será a gama de produtos que pode ser processada.

2.2.3. ARQUITETURA DE UM SISTEMA DE MANUFATURA

Em [Liu et. al., 98], três objetos são usados para dar uma completa descrição de um sistema automático de manufatura: físico, de informação e de controle.

Um objeto físico é aquele que possui um correspondente no mundo real. Um objeto de informação pode ou não ter um correspondente tangível no mundo real. Um objeto de controle / decisão é um objeto lógico que, em geral, não possui correspondente no mundo real.

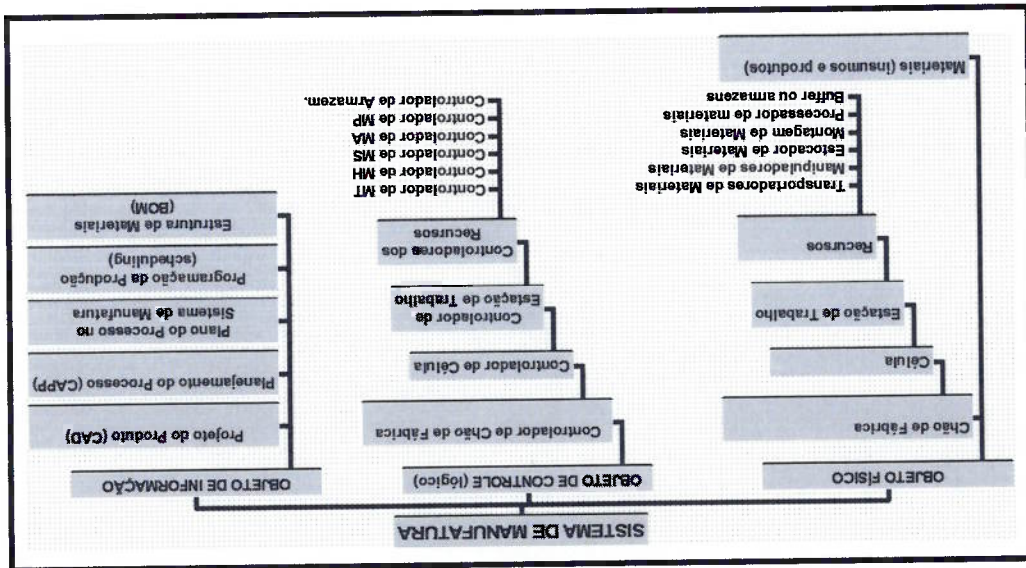
A Figura 2-2 mostra a representação desta arquitetura para sistemas de manufatura flexível. Nela é possível observar que há uma estrutura hierárquica dos sistemas de manufatura, onde o chão de fábrica é composto por células de manufatura e, estas, por estações de trabalho. A seguir apresenta-se, com mais detalhes, a estruturação destas tecnologias.

Uma estação de trabalho pode ser composta por um ou, então, no máximo, dois elementos de processamento ou montagem e por um elemento de manipulação ou transporte [Inamasu, 95].

Os elementos de manipulação, transporte, estocadores automáticos de materiais e os *buffers* (armazéns) são utilizados em todos os níveis com a finalidade de integrar e garantir o adequado fluxo de materiais.

O objeto de informações - através de tecnologias como o planejamento do processo, projeto do produto e programação da produção - dá o suporte necessário para, através de uma lógica estabelecida e considerando sinais vindos do chão de fábrica, operacionalizar o controle do chão de fábrica. A seguir serão detalhados o objeto físico e o de informações (planejamento e plano do processo).

Figura 2-2 Arquitetura de um Sistema de Manufatura Flexível.



2.2.4.OBJETO FÍSICO

O objeto físico, conforme pode-se observar pela Figura 2-2, é composto, no seu nível mais baixo, por recursos físicos e materiais. Segundo Jefery adube [Liu et al., 98], estes recursos são divididos em 4 classes básicas: manipuladores de materiais (MH - *material handler*), processadores de materiais (MP - *material processor*), transportadores de materiais (MT - *material transporter*) e estocadores automáticos de materiais (MS - *material storage*). Além destas, na Figura 2-2, foi acrescentada uma classe responsável pela montagem de materiais (MA - *material assembling*) e outra responsável pelas situações de espera (BU - *buffer*).

As seis classes acima citadas, devido às suas funções, podem ser divididas em duas, sendo uma responsável pela transformação física nos insumos (MP e MA) e outra pela transformação lógica (MH, MT, MS, BU).

A transformação física pode ser permanente, quando executada pelo processador de materiais (MP), ou reversível, quando pode retornar, total ou parcialmente, aos insumos iniciais que compõem o novo produto e, sendo assim, realizadas pelo elemento de montagem de materiais (MA). A transformação lógica é realizada pelos elementos de manipulação (MH), transporte (MT) e estocadores automática de materiais (MS), e elementos de espera (BU).

Os elementos manipuladores de materiais são aqueles que se movem em uma maneira específica, sendo um exemplo clássico os robôs industriais ou manipuladores mecânicos.

Os transportadores de materiais são responsáveis pela movimentação entre diversas localizações do sistema de manufatura, podendo ser flexíveis, representados

Cada empresa tem necessidades diferentes para documentação de seus processos, conforme a realidade do seu chão-de-fábrica, tanto em termos de equipamentos quanto de pessoal. A Figura 2-3 mostra o planejamento do processo como uma seqüência de atividades e o plano ou folha de processos como resultado.

O planejamento de processos define em detalhes como se transforma a matéria-prima no produto desejado. O documento resultante, conhecido como plano de processo, é a base para se realizar o planejamento da produção e serve como referência à produção propriamente dita, podendo ser considerado o elo de ligação entre o projeto, o planejamento da produção e o chão-de-fábrica [Horta et. al., 99].

2.2.5. PLANEJAMENTO DO PROCESSO

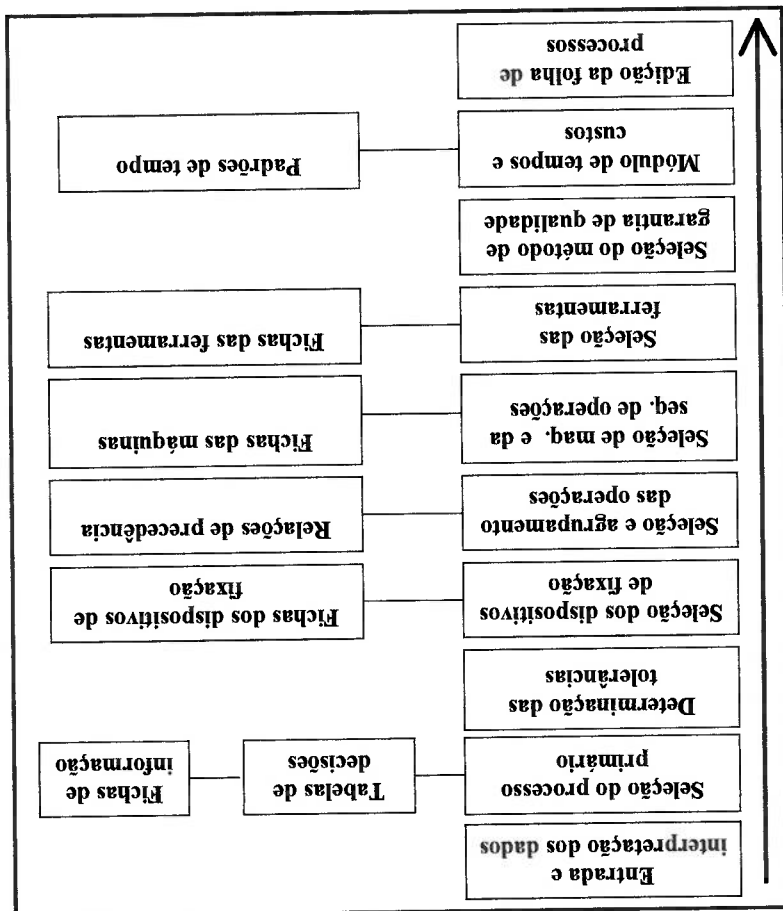
Os estocadores de materiais são dispositivos que, através de um controle computacional, realizam a atividade do transporte automático de materiais para os locais de estocagem.

Veículos Autônomos de Transporte podem ser AGVs (*Auto Guided Vehicles*) e veículos dirigidos por operadores. Estes elementos de transporte possuem autonomia para a definição de suas rotas levando os materiais para diversas áreas da empresa.

por veículos autônomos de transporte, ou rígidos, representados por transportadores de roletes, por correias, com camada de ar e modulares, realizando o transporte em rotas fixas.

O desenvolvimento de um plano de processo inicia-se, geralmente, a partir de um desenho do produto. A forma do novo produto é definida pelo projetista e expressa na forma de desenhos, sejam estes de fabricação (GDT – *Geometric Dimensioning and Tolerances*) ou de conjunto. A partir das informações de projeto, o processista passa a sequenciar as operações e selecionar os equipamentos adequados, acabando por gerar a rota de cada peça no dado chão de fábrica. Em uma fase posterior, estas operações são detalhadas no nível requisitado pelas características da empresa.

Figura 2-3 Sequência para realização do planejamento do processo



Modelar um sistema produtivo implica no tratamento de uma variedade ampla de tarefas a serem realizadas pelo sistema e em um complexo espectro de atividades funcionais inerentes ao comportamento dinâmico pretendido [Santos Filho, 98]. Assim, as características fundamentais que deveriam estar presentes em uma particular ferramenta de modelagem seriam:

O uso do microcomputador a partir do final dos anos oitenta, acompanhado por uma rápida evolução do mercado, com clientes (público consumidor) cada vez mais exigentes, possibilitou o surgimento de sistemas de manufatura altamente automatizados e flexíveis, com a capacidade de tratar uma variedade de produtos de volume médio e admitir rápidas alterações no processo, alcançando melhoria de produtividade sem perder a qualidade dos produtos.

2.3.1. REQUISITOS

2.3. MODELAGEM DA MANUFATURA

- ferramentas, instruções de qualidade, folha de CEP, programas de CN.
- **Detalhamento das operações:** são informações de apoio ao chão-de-fábrica tais como, instruções e croquis para montagem de máquinas e do ferramental, lista de para o planejamento e controle da produção.
 - **Plano macro:** determina a sequência de operações executadas no ambiente fabril, ou seja, específica a rota pela qual a peça será fabricada. O plano macro é a base para o planejamento e controle da produção.
- todos eles:

Apesar da diversidade de planos de processo existentes, pode-se identificar, segundo [Horta et. al., 99], pelo menos dois conjuntos de informações comuns a

1. Capacidade de representação de características como causalidade, sincronização de eventos, compartilhamento de recursos, conflitos, sequenciamento e paralelismo de atividades.

2. Possibilidade de gerar modelos interpretados em que seja possível associar aos itens do modelo as entidades físicas do mundo real ou, ainda, modelar globalmente as várias partes do sistema integradas por intermédio de fluxos (materiais e informações).

3. Os elementos da manufatura que devem ser representados são os materiais (insumos e produtos), recursos físicos, atividades, operações, eventos e, por fim, as regras e lógicas de decisões. Além destes deve possibilitar a associação do tempo ao modelo.

4. Representação gráfica simples de usar, mesmo por aqueles que não são especialistas, facilitando a documentação, compreensão, monitoração, manutenção e atualização do sistema, devendo ser facilmente interpretada e discutida por todos os autores envolvidos no processo de modelagem.

5. Formalismo matemático adequado para permitir as análises qualitativa e quantitativa do modelo servindo de base para a tomada de decisão.

Um sistema de manufatura pode ser considerado ou não um SFD (Sistema a Eventos Discretos) de acordo com o nível de detalhamento de seu modelo [Valette et. al., 90]. Os SFDs possuem como característica a evolução dos sistemas no tempo em função de interações entre os vários eventos [Ho, 89]. As Redes de Petri na modelagem SFD são uma das ferramentas de maior relevância para a modelagem de sistemas de manufatura [Cao et. al., 90].

2.3.2. REDES DE PETRI E SUAS MODIFICAÇÕES

As Redes de Petri podem ser divididas em 3 classes básicas: Redes de Petri

Ordinárias (versão original ou modelo básico), reduções (possuem a capacidade de realizar modelos com menos elementos) e extensões (onde as regras da funcionamento sofrem alterações para enriquecer a capacidade de representação) [Santos Filho, 98][Palomino, 95]. A seguir detalha-se as Redes de Petri Ordinárias e as principais reduções e extensões.

2.3.2.1. Redes de Petri Ordinárias

As Redes de Petri podem ser definidas como grafos bipartidos e disjuntos. A

definição formal é dada por $N = (P, T, I, O, Mi)$, onde: P é um conjunto finito de lugares, T é um conjunto finito de transições, I é um conjunto finito de arcos de entrada: $P \times T$; O é um conjunto finito de arcos de saída: $T \times P$ e, M_i , é a marcação inicial. Nas Redes de Petri Ordinárias, para haver o disparo de uma transição, basta que todo lugar de entrada possua pelo menos uma marca. Graficamente os lugares são representados por círculos, as transições por retângulos, os arcos de entrada por setas direcionadas de lugares a transições e os arcos de saída por setas direcionadas de transições a lugares.

2.3.2.2. Reduções

Os modelos de redução das Redes de Petri são [Santos Filho, 98]:

Redes de Petri Generalizadas: com a atribuição de pesos nos arcos;

Redes de Petri Lugar/Transição ou Limitada: associação a cada lugar de uma

dada capacidade de marcas, onde o disparo de uma transição só é possível se não resultar em um número de marcas que exceda a capacidade do lugar;

Redes de Petri Condição/Evento: quando o peso dos arcos e a capacidade dos

lugares for igual a um;

Redes de Petri Coloridas: atribuição de variáveis (cores) nas marcas tornando-as individuais. As características das redes de Petri Coloridas são adequadas para condensar sistemas compostos por diversos subsistemas de estrutura e comportamentos semelhantes [Jensen, 96][Santos Filho, 98][Palomino, 95].

2.3.2.3. Extensões

As extensões foram desenvolvidas com a finalidade de aumentar o poder de modelagem das Redes de Petri. As extensões das redes de Petri podem ser associadas aos seus vários elementos estruturais: arcos, transições e lugares.

As extensões associadas aos arcos:

As extensões associadas aos arcos são os arcos inibidores e os habilitadores [Santos Filho, 98][Palomino, 95]. Os arcos inibidores são utilizados para comprovar diretamente a ausência de marcas em um determinado lugar, significando que a transição pode disparar somente se o lugar de onde sai o arco inibidor não contiver nenhuma marca, enquanto que os arcos habilitadores comprovam diretamente a presença de uma marca em um determinado lugar.

As extensões associadas às transições:

Redes de Petri Contínuas: o disparo de uma transição determina um fluxo contínuo, sendo associado um determinado equacionamento a variáveis contínuas ou uma taxa de disparo [Santos Filho, 98]. A utilização de lugares e transições discretas e de transições contínuas dá origem às Redes de Petri Híbridas.

Um sistema de manufatura consiste de uma variedade de componentes relacionados a processos específicos [Zhou et. al., 95][Cao et. al., 90]. A Figura 2-4 mostra como são os modelos (Redes de Petri) para representar propriedades da manufatura como, por exemplo, o processamento paralelo e o sequencial.

2.3.3. PROPRIEDADES DA MANUFATURA MODELADAS POR REDES DE PETRI

Rede de Petri P-Temporizada: nesta rede, uma marca depositada num lugar permanecerá indisponível por um determinado período de tempo, após o qual torna-se, então, disponível [Palomino, 95][Zhou et, al., 95]. Somente marcas disponíveis são consideradas para habilitar transições.

As extensões associadas aos Lugares:

Redes de Petri Estocásticas: possuem um tempo aleatório ou probabilístico associado com o disparo de cada transição [Zhou et. al., 95] [Al-Jaar et. al., 90].

Redes de Petri Temporais: consistem na atribuição de um intervalo de tempo de disparo, de modo que a transição deve permanecer sensibilizada durante a espera mínima T_{min} . antes de poder ser disparada, e não pode ser disparada após a espera máxima T_{max} [Palomino, 95][Zhou et. al., 95].

Redes de Petri T-Temporizadas: a partir do momento que uma transição torna-se habilitada e, ocorrida a retirada das marcas dos lugares de entrada com o seu disparo, há um retardo de tempo para a marca ser depositada em cada lugar de saída da transição [Santos Filho, 98][Palomino, 95][Zhou et. al., 95].

1. Identificar operações e recursos: dada a descrição de um sistema, identificar os eventos, operações, processos, recursos e condições;
2. Identificar as relações: relacionar as operações, os recursos e seu compartilhamento;

Em [Zhou et al., 95] tem-se que a sequência a ser seguida para a modelagem

2.3.4. MÉTODO PARA MODELAGEM DE SISTEMAS DE MANUFATURA

Assim, quanto a funcionalidade, os sistemas de manufatura podem executar operações sequenciais (quando uma operação segue a outra), concorrentes (quando duas operações são iniciadas pelo mesmo evento), cíclicas (quando uma operação segue uma sequência e após finalizada é reiniciada) e alternativas (quando uma ou outra operação pode ser realizada). O compartilhamento dos recursos implica que a realização de uma operação por um recurso restringe a de outra.

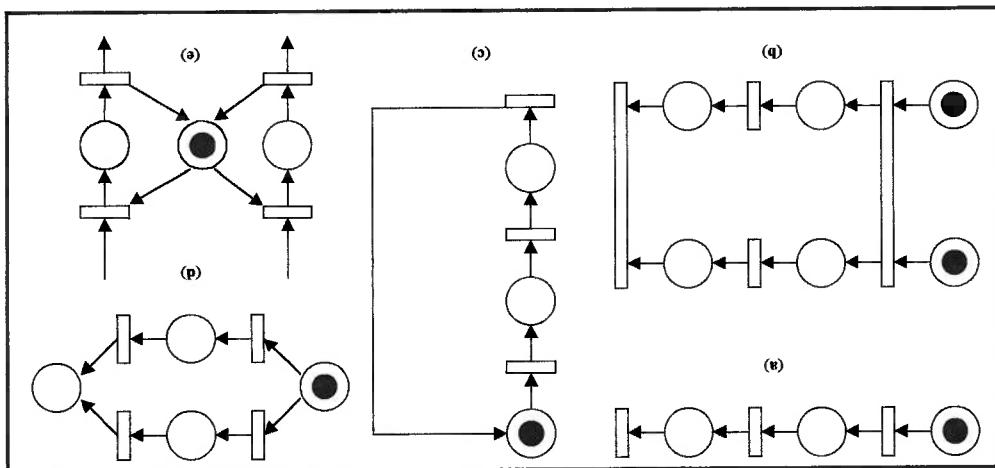


Figura 2-4 Modelos de operações: (a) sequenciais, (b) concorrentes, (c) cíclicas, (d) alternativas e (e) compartilhamento de recursos [Zhou et al., 95].

3. Projeto em Redes de Petri: desenhar os lugares e/ou transições que representam eventos operações e/ou processos e arranjar de acordo com as relações identificadas. Associar os modelos modificados das Redes de Petri para contemplar os requisitos de projeto;
4. Modificações dos modelos em Redes de Petri: verificar se o modelo em rede reflete a operação do sistema e, a seguir, modificar a rede até se ter o modelo do sistema.

2.3.5. PROPRIEDADES DOS MODELOS EM REDES DE PETRI

As Redes de Petri, como ferramenta matemática, possuem um determinado número de propriedades que, quando interpretadas no contexto do sistema modelado, permitem ao projetista identificar a presença ou ausência de domínios de aplicações [Zhou et. al., 95].

Há dois tipos distintos de propriedades: as comportamentais e as estruturais. As propriedades comportamentais dependem da marcação inicial do modelo enquanto que as propriedades estruturais dependem da topologia ou estrutura do modelo [Zhou et. al., 95][Murata, 90]. Nesta seção apresentam-se as propriedades comportamentais dos modelos em Redes de Petri. Outras propriedades comportamentais além das apresentadas podem ser encontradas em [Murata, 89]:

- **Alcancabilidade (Reachability)**: A alcancabilidade é, segundo [Murata, 89], fundamental para estudar as propriedades dinâmicas dos sistemas. Para se definir alcancabilidade, dois conceitos são importantes:

1. O disparo de uma transição habilitada muda a marcação do modelo.

2. Uma sequência de disparos resulta em uma sequência de marcações.

Assim, para [Zhou et. al., 95][Murata, 89], uma marcação M_n é dita alcançável se existir uma sequência de disparos que transforme uma marcação M_0 em M_n . Através desta propriedade é possível avaliar se os estados alcançados pelo modelo fazem, realmente, parte do comportamento dinâmico do sistema real.

- **Limitabilidade (Boundedness) e Segurabilidade (Safeness):** A

limitabilidade (*boundedness*), para [Zhou et. al., 95][Murata, 89], é responsável por identificar a existência de excesso de marcas (*overflow*) no sistema modelado. Um lugar (p) é dito k-limitado (*k-bounded*) se o número de marcas em p é sempre menor ou igual a k para toda marcação alcançável a partir da marcação inicial. Um lugar é seguro se k for igual a l e uma rede é segura se todo lugar é seguro.

- **Conservatividade (Conservativeness):** Uma rede é dita conservativa se o

número de marcas é conservado [Zhou et. al., 95][Murata, 89]. Do ponto de vista da avaliação de sistemas de manufatura, esta propriedade é importante uma vez que os recursos não podem ser criados nem destruídos.

- **Vivacidade (Liveness):** Uma rede é dita viva quando não entra em

situação de bloqueio (deadlock). Uma situação de bloqueio ocorre quando não há a possibilidade de haver transições habilitadas e o consequente disparo. O bloqueio em sistemas de manufatura é tratado em [Xing et. al., 95] [Viswanadham et. al., 90] [Banaszak et. al., 90].

2.3.6. MÉTODOS DE ANÁLISE DE MODELOS EM REDES DE PETRI

O formalismo matemático das Redes de Petri permite que se faça tanto análises qualitativas como quantitativas. A análise qualitativa avalia os aspectos de natureza lógica do modelo (se o modelo está coerente com aquilo que se quer representar), enquanto que a quantitativa mede o desempenho do sistema modelado.

Os métodos de análises qualitativas baseiam-se no estudo das propriedades comportamentais das Redes de Petri e as quantitativas na evolução dos modelos desenvolvidos nas modificações temporizadas das Redes de Petri [Zhou et. al., 95][Murata, 90].

2.3.6.1. Métodos para análise qualitativa

As propriedades das Redes de Petri são usadas para analisar os sistemas modelados. Um dos objetivos da análise qualitativa é saber se existe, de fato, uma correspondência funcional entre o modelo em Rede de Petri e os requisitos especificados no sistema objeto de estudo. A seguir, serão apresentados alguns métodos para se realizar análises qualitativas.

- **Árvore de Alcançabilidade:** Este método é baseado na enumeração de todas as possíveis marcações alcançadas a partir da marcação inicial. Os resultados obtidos com este método são [Zhou et. al., 95]:

1. A possibilidade de procurar o máximo número de marcas em um lugar;
2. Se cada nó da árvore contém apenas zeros e uns, então a rede é *segura*;
3. O número de *mortes* é o número de *bloqueios* da rede;
4. Uma transição é morta se não aparece como um arco inscrito na árvore;

5. Se dado dois nós quaisquer, na árvore de alcançabilidade, houver um caminho direto e todas as transições estão presentes, então a rede é viva;

6. Se há um caminho direto de algum nó para a marcação inicial na árvore, então a rede é reversível.

A limitação deste método é a explosão combinatória dos estados.

- **Análise de Invariantes:** Os arcos descrevem as relações entre lugares e transições e podem ser representados por duas matrizes. Pelo estudo das equações lineares, baseado nas regras de execução e nas matrizes, pode-se procurar sub-conjuntos de lugares onde o total de marcas são imutáveis. Pode-se também procurar uma sequência de disparos para se alcançar uma determinada marcação. Este método possui como limitação o fato de não incluir todas as informações de uma Rede de Petri geral.

- **Redução:** A abordagem do método de redução aplica o princípio de decomposição para analisar uma rede. Assim, há a simplificação das sub-redes ou estruturas preservando as propriedades principais, sendo capaz de derivar as propriedades para uma rede complexa.

- **Simulação:** Para modelos complexos em Redes de Petri, simuladores a eventos discretos é um outro meio para verificar as propriedades dos sistemas. Esta técnica pode mostrar a presença de propriedades indesejáveis mas não prova que os modelos estão corretos.

2.3.6.2. Métodos para análises de desempenho

O desenvolvimento de sistemas requer que sejam encontrados tanto os requisitos funcionais quanto os de desempenho. Dependendo do estágio de desenvolvimento de um sistema, o conhecimento do desempenho aproximado ou exato (ou ambos) pode ser requerido. Estas informações servem como base para tomada de decisões quando se pretende conseguir o sistema com o melhor desempenho. Os simuladores a eventos discretos são a única alternativa viável para se avaliar o desempenho de um sistema, uma vez que podem possuir em sua lógica de operação o consumo de tempo [Zhou et. al., 95].

Para o conhecimento do desempenho exato, através de modelos em Redes de Petri, são utilizadas as extensões temporizadas determinísticas (Redes de Petri P-Temporizadas e T-Temporizadas) e para a análise de desempenho aproximado são utilizadas as extensões temporizadas estocásticas (Redes de Petri Estocásticas).

2.4. MÉTODOS BASEADOS EM REDES DE PETRI INTERPRETADAS

Os métodos interpretados são aqueles que seguem o passo 1 e 3 da sistemática proposta por [Zhou et. al., 95], o passo 1 em razão dos métodos possuírem uma semântica que relaciona elementos estruturais das Redes de Petri com entidades características da manufatura e o passo 3 em razão de agregarem algumas modificações das Redes de Petri.

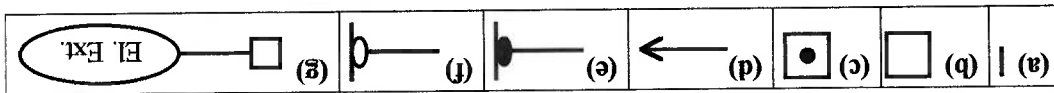
Assim, foram estudados alguns dos mais relevantes trabalhos: o MFG [Miyagi, 96] [Santos Filho, 93] [Santos Filho, 98], o E-MFG [Santos Filho, 98], o PFS/MFG [Miyagi, 96] [Santos Filho, 93] [Santos Filho, 98]

Os boxes do MFG são modularizados para servir à aplicações reais; assim, o box capacidade é utilizado para representar um determinado armazenamento de

- (g) Arco de sinal de saída e box.
- (f) Porta inibidora: inibe a ocorrência dos eventos;
- (e) Porta habilitadora: habilita a ocorrência dos eventos;
- (d) Arcos orientados: estabelecem uma relação causal entre os eventos e as condições;
- (c) Boxes marcados: indicam a manutenção de uma condição;
- (b) Boxes: representam as pré e pós condições;
- (a) Transições: indicam a ocorrência de eventos;

Os elementos estruturais do MFG, dados pela Figura 2-5, Figura 2-5 são:

Figura 2-5 Elementos estruturais do MFG.



de sistemas de manufatura. rede interpretada derivada das Redes de Petri, utilizada no processo de modelagem O MFG, segundo [Miyagi, 96][Santos Filho, 98][Santos Filho, 93], é uma

2.4.1. MARK FLOW GRAPH (MFG)

possibilidade de converter o modelo facilmente em Redes de Petri. Rede de Petri Interpretada possui elementos estruturais associados à manufatura e a e, também o método Porto [Porto, 90] [Inamasu, 95], pois apesar de não ser uma

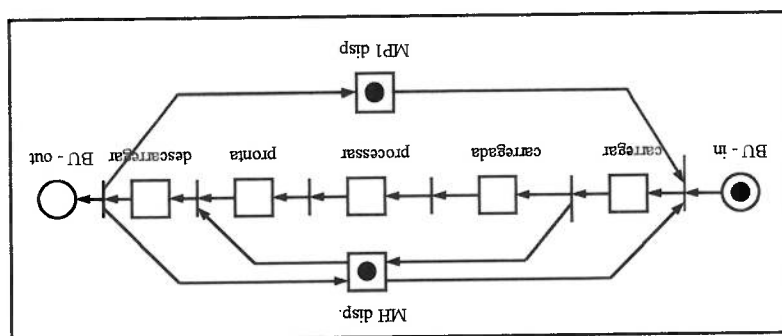
O E-MFG amplia os recursos de modelagem do MFG, introduzindo o conceito de marcas individuais e regras adicionais para o controle do disparo das transições. As marcas individuais são acompanhadas por um vetor de atributos que garantem a sua individualidade [Santos Filho, 93][Santos Filho, 98]. A estes atributos pode-se associar diversas informações referentes ao produto, ao processo e elaboradas.

flexibilidade operacional, exigindo a concepção de regras de controle mais eficiência no processo de modelagem de sistemas, que apresenta maior grau de em [Santos Filho, 93], a partir da verificação da limitação do MFG quanto a O E-MFG (Mark Flow Graph Estendido) é uma extensão do MFG proposto

2.4.2. MARK FLOW GRAPH ESTENDIDO (E-MFG)

máquina. realizadas para um processo de manufatura onde são alocados um robô e uma A Figura 2-6 mostra um exemplo, em MFG, de uma seqüência de operações

Figura 2-6 Exemplo de um modelo em MFG [Santos Filho, 93].



representam um determinado retardo de tempo. desagrupador, similar a uma operação de desmontagem e os boxes temporizados marcas, o box agrupador é similar a uma operação de montagem, o box

ao controle. Além da extensão nas marcas foi acrescentado o box controlador que tem como função a alteração condicionada dos estados das marcas e os arcos orientados com inscrições que são responsáveis pela filtragem seletiva.

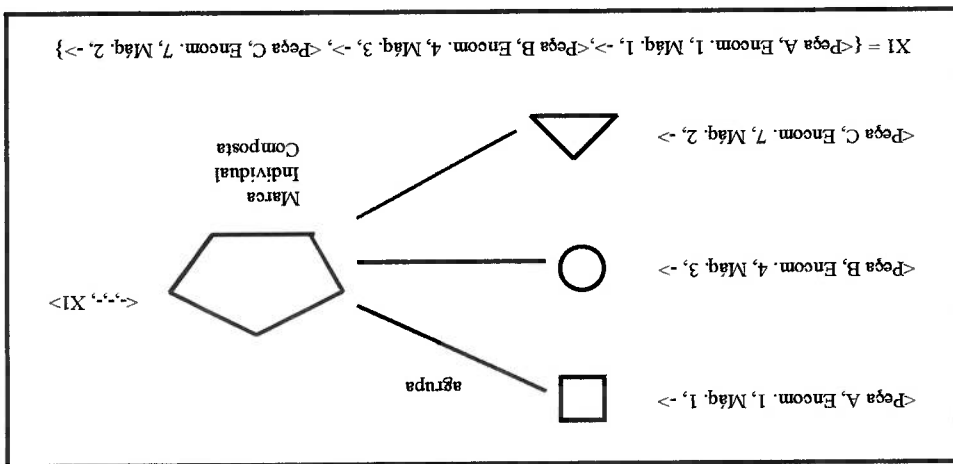


Figura 2-7 Exemplo de marca individual composta.

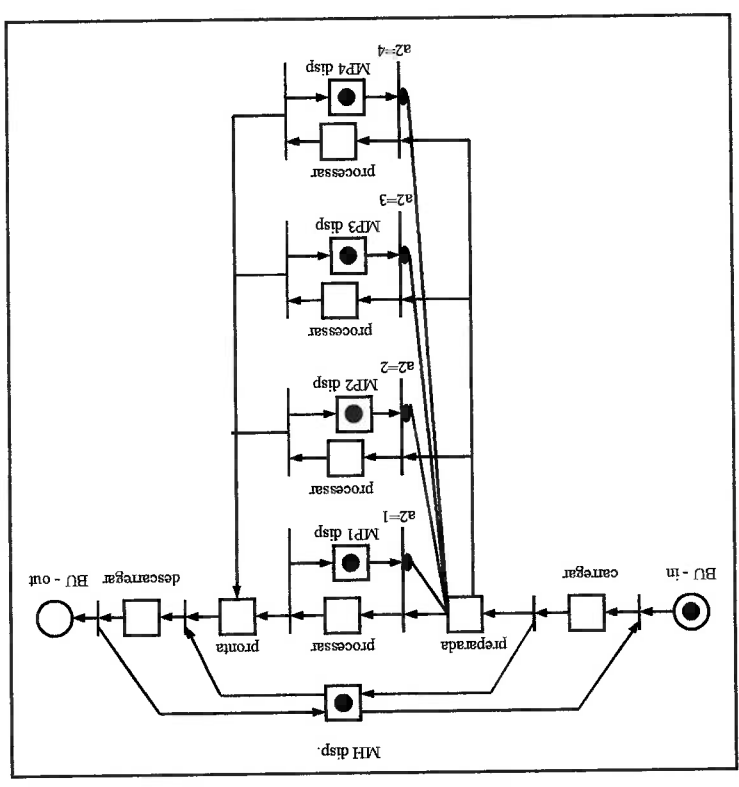
As marcas individuais, no E-MFG, podem ser divididas em dois tipos: simples e compostas, sendo as marcas individuais compostas formadas por marcas individuais "simples", conforme pode ser observado na Figura 2-7. O uso das marcas individuais compostas, em sistemas de manufatura, ocorre, por exemplo, nos processos de paletização e nas operações de montagem.

O método PFS consiste de uma rede de alto nível utilizada para descrever, conceitualmente, os processos relacionados com a produção de itens (peças, produtos, informações, etc.) sob a forma de seqüências de etapas de atividades e de distribuição [Santos Filho, 98][Miyagi, 96]. A Figura 2-9 mostra os elementos constituintes do PFS.

2.4.3. PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS)

A Figura 2-8 mostra um exemplo de aplicação do E-MFG em um sistema composto por 3 máquinas e 1 robô, onde dependendo do valor assumido pelo atributo <a2> da marca que estiver no box (peça preparada) a operação a ser realizada será em Maq. 1 (a2=1), Maq. 2 (a2=2), Maq. 3 (a2=3) ou em Maq. 4 (a2=4).

Figura 2-8 Exemplo de modelagem baseada em E-MFG [Santos Filho, 93].

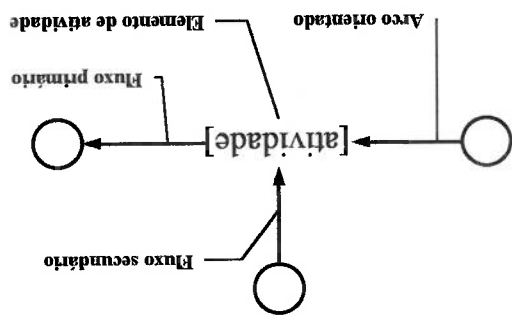


O método PFS/MFG está baseado em uma abordagem “top-down”, estrutural e hierárquica para o desenvolvimento de projetos. Há uma substituição das atividades e distribuidores do modelo de alto nível em PFS por uma rede mais detalhada em PFS ou MFG, sendo que no nível mais detalhado do projeto, a rede deverá possuir apenas modelos em MFG interpretados. A característica de maior relevância do PFS/MFG é permitir que um modelo conceitual desenvolvido em uma linguagem relativamente informal, como o PFS, se torne um modelo desenvolvido em MFG nos níveis mais baixos. Note que o método não é estruturado devido à existência dos fluxos secundários.

2.4.4.METODO PFS/MFG

Assim, os elementos estruturais básicos do PFS são: atividades (análogo a transições), distribuidores (análogo a lugares) e arcos. Graficamente, as atividades são delimitadas por colchetes e os distribuidores representados por círculos. Nota-se que no PFS não existe o conceito de marcas, de marcação e de comportamento dinâmico, pois o modelo gerado é apenas conceitual e estático.

Figura 2-9 Elementos do PFS.



2.4.5. MÉTODO PORTO

Em [Porto, 90], foi proposto um método para o planejamento do processo de fabricação e controle da produção baseado na flexibilidade do processo de fabricação.

O objetivo principal do método Porto é o máximo aproveitamento da capacidade instalada através do estudo da flexibilidade da produção. Para a modelagem são criados planos de processos geral (modelo geral), o plano de processo básico (modelo básico) e o plano de processo preferencial (modelo preferencial). Os elementos estruturais do método Porto estão representados na

Figura 2-10.

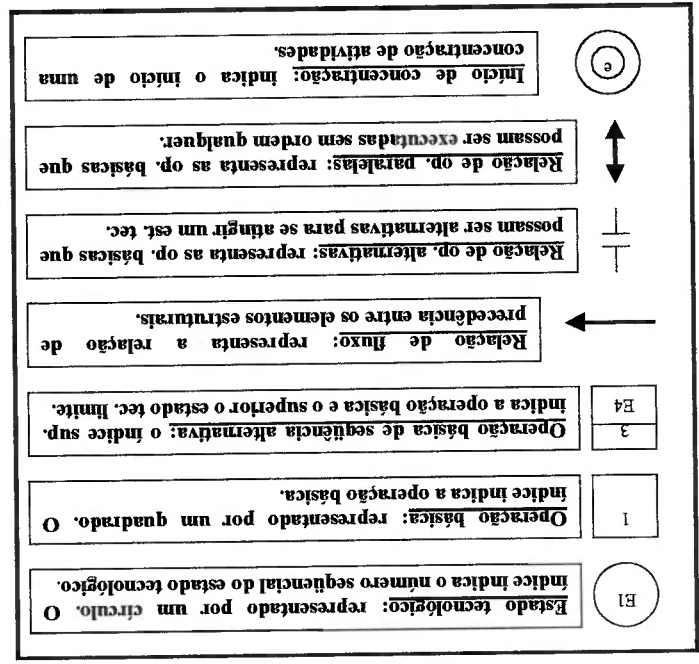


Figura 2-10 Elementos estruturais do método Porto [Porto, 90].

A expressividade do modelo Porto para o planejamento do processo de produção é uma de suas características fundamentais e a sua fácil "transformação"

em redes de Petri C/E tornam seu modelo formal. Abaixo, na Figura 2-11, apresenta-se um exemplo do modelo básico do processo de fabricação de uma peça.

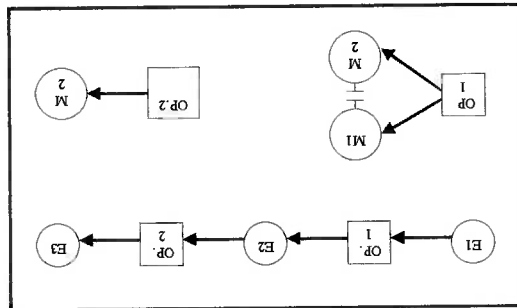


Figura 2-11 Exemplo de um processo de fabricação [Porto, 90].

No exemplo da Figura 2-11 tem-se que para a peça passar do estado inicial para o estado 2 ela deverá sofrer a operação 1, e a operação 1 poderá ser realizada tanto pela máquina M1 como pela máquina M2, e, para sofrer a transformação do estado tecnológico 2 para o estado tecnológico final, a peça deverá sofrer a operação 2 que é realizada apenas pela máquina M2.

O modelo da Figura 2-12 mostra, para o exemplo da Figura 2-11, o modelo detalhado do processo, onde há a inclusão das máquinas na rede. Isto é feito quando se substitui os elementos que representam as operações por elementos que representam operações e equipamentos responsáveis. O modelo detalhado pode facilmente ser transformado em Redes de Petri para, então, servir como base para análise do sistema.

2.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

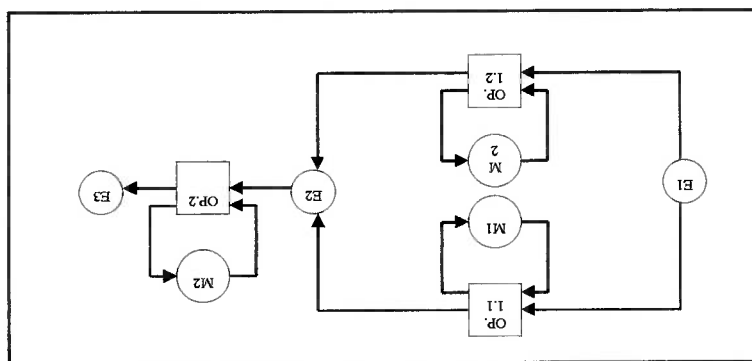
Inicialmente definiu-se o sistema de manufatura como responsável pela transformação de insumos em produtos; em seguida foi apresentada a arquitetura de um sistema de manufatura com os principais objetos que a compõem: físico, de controle e de informações.

As Redes de Petri foram apresentadas como uma técnica para a modelagem de sistemas de manufatura devido às diversas modificações, propriedades e métodos de análise. Já nos métodos interpretados é observada a associação de características próprias dos sistemas de manufatura aos elementos estruturais da técnica das Redes de Petri.

Analisando a modelagem dos sistemas de manufatura por Redes de Petri e pelos métodos interpretados verifica-se que, para a concepção dos modelos, inicialmente parte-se de operações e atividades para, em seguida, compartilhar os recursos. Esta é uma abordagem funcional de modelagem.

A medida que os sistemas de manufatura tornam-se mais complexos - entenda-se aqui complexidade como sendo um aumento na quantidade de processos a

Figura 2-12 Exemplo do modelo detalhado do processo de fabricação.



serem realizados por uma mesma estrutura (objeto físico – chão de fábrica) - vai-se distanciando da representação do relacionamento entre os diversos recursos físicos. Assim, seria muito interessante, propor o estabelecimento de uma visão capaz de explicitá-lo, proporcionando uma ampliação do poder de modelagem e, também, de sua compreensão.

Neste capítulo são propostos uma filosofia e um novo método para a modelagem de sistemas de manufatura com “ênfase” não apenas na visão funcional, representado operações e atividades, mas também na visão relacionamento existente entre os diversos recursos físicos. As duas visões integradas colaboram para proporcionar uma completa descrição do fluxo de materiais. Este método permite, acima de tudo, a concepção de modelos para a manufatura peça a peça, conforme requisito objetivo deste trabalho.

3.1. INTRODUÇÃO

3. MÉTODO DE MODELAGEM PROPOSTO

3.2. FILOSOFIA DE MODELAGEM

3.2.1.0 NOVO ENFOQUE NA MODELAGEM

Conforme pode ser constatado no Capítulo 2, tanto pelo método para modelagem de sistemas de manufatura proposto por [Zhou et. al., 95], quanto nas Redes de Petri interpretadas há um enfoque nas operações e atividades. Os recursos são, então, compartilhados para os diversos processos, dentro de uma mesma representação.

A Figura 3-1 apresenta um modelo, em MFG, de uma estação de trabalho composta por um *buffer* (máquina de entrada), um robô para manipulação de peças e duas máquinas de processamento.

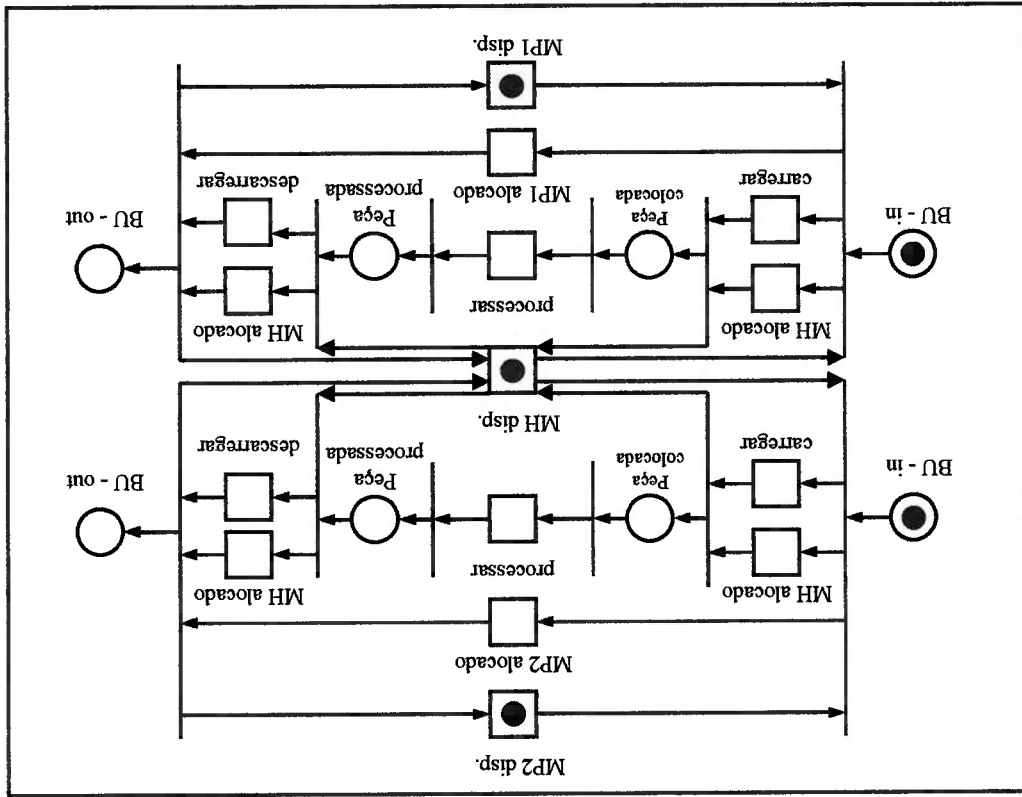


Figura 3-1 Modelo, em MFG, de uma estação de trabalho compartilhando recursos para 2 processos.

A partir do modelo da Figura 3-1, pode-se concluir o seguinte:

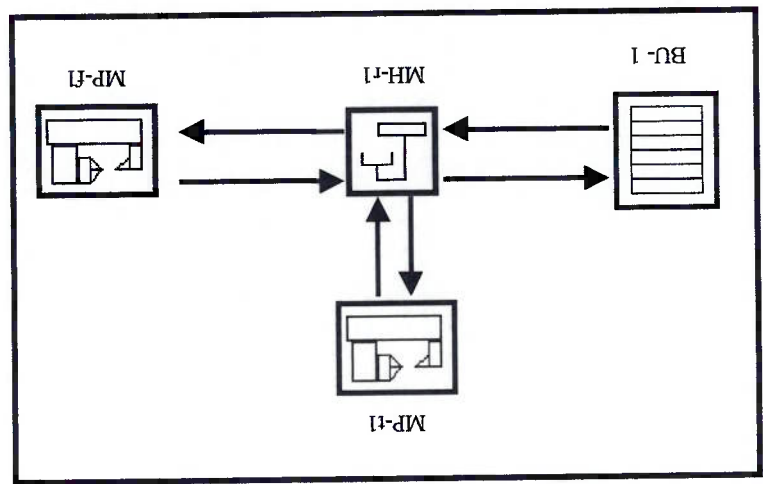
- Cada processo, em separado, desenvolve uma sequência de atividades determinadas pelos estados da rede (representado pelos boxes marcados).
- Os recursos são alocados para a realização das atividades. Assim, as máquinas 1 (processo 1) e 2 (processo 2) realizam o processamento, o robô as atividades de carga para a máquina 1 (processo 1) e para a 2 (processo 2) e descarga da máquina 1 (processo 1) e da 2 (processo 2).

- É importante também destacar que neste modelo, os recursos podem se encontrar em dois os estados: alocado, quando o box recurso estiver marcado, ou disponível, quando o box recurso disponível estiver marcado. Esta forma de modelagem não permite que sejam representados os relacionamentos existentes entre os diversos recursos físicos.

O método utilizado para a modelagem, conforme empregado na Figura 3-1, parte de um modelo dos processos e como, neste trabalho, há a intenção de se fazer uma modelagem voltada à análise por simulação de sistemas de manufatura para obter uma consistente representação do fluxo de materiais em um dado chão de fábrica, tem-se, então, uma mudança no enfoque inicial da sistemática de modelagem, conforme a Figura 3-2 representa.

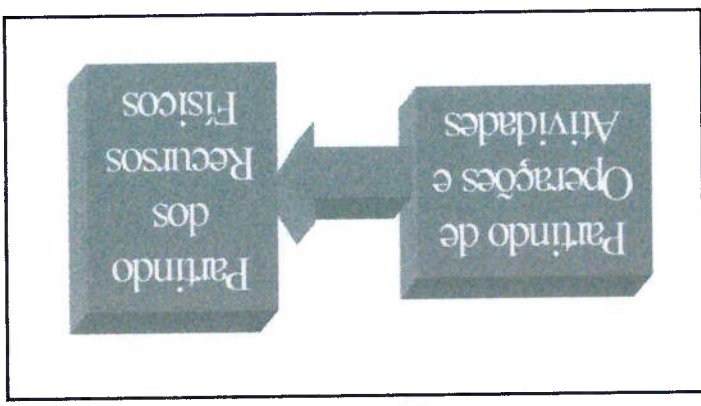
O mesmo relacionamento que ocorre entre os recursos na Figura 3-3 deverá ser mantido pela filosofia de modelagem proposta, assim como a representação coerente dos processos que ocorrem dentro deste sistema de manufatura. Na seção

Figura 3-3 Sistema de manufatura composto por 1 BU, 1 MH e 2 MP



Considerando esta nova sistemática para a modelagem de sistemas de manufatura, a Figura 3-3 representa uma estação de trabalho composta por um buffer (BU), um elemento de manipulação (MH) e 2 elementos de processamento (MP). Esta estrutura física pode representar o ambiente no qual são executados os processos representados pela Figura 3-1.

Figura 3-2 Mudança no enfoque da sistemática de modelagem.



seguinte é apresentada a filosofia de modelagem proposta para atender a esta mudança de enfoque inicial para modelagem da manufatura.

3.2.2.FILOSOFIA DE MODELAGEM

A filosofia de modelagem proposta consiste de um modelo do relacionamento existente entre os diversos recursos físicos - chamado de modelo dos recursos (caracterizando a parte física) - e de um modelo que define o processo de fabricação de cada produto individualmente - chamado de modelo de processos - desenvolvido a partir de uma abordagem funcional. Destes dois modelos gera-se o modelo do sistema de manufatura. A Figura 3-4, abaixo, ilustra esta filosofia.

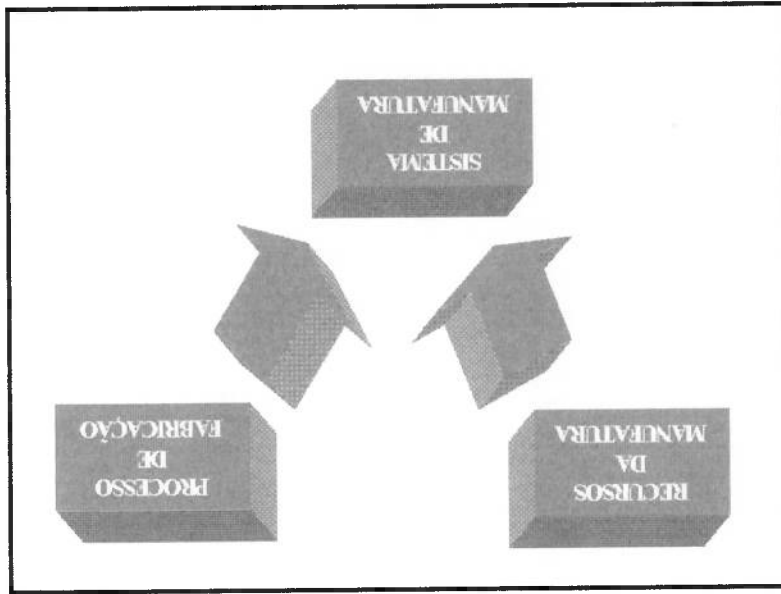


Figura 3-4 Filosofia de modelagem do sistema de manufatura e do processo de fabricação.

De uma forma mais detalhada, inicialmente tem-se de um lado a concepção de um modelo dos recursos e, do outro, a dos modelos que representam os processos nesta dada estrutura física. Compilando estas duas visões de modelagem é possível

gerar o modelo completo do sistema de manufatura, representando a estrutura física e o fluxo de materiais e um modelo único.

3.3. MÉTODO DE MODELAGEM

Nesta seção serão detalhados os procedimentos de modelagem tanto para o modelo dos recursos como para os modelos dos processos, assim como, a rede interpretada. Estes modelos são a base para a geração do modelo do sistema de manufatura compilado (modelo completo).

3.3.1. MODELO DE RELACIONAMENTO ENTRE OS RECURSOS

3.3.1.1. Procedimentos para modelagem

O modelo de relacionamento entre os recursos físicos utiliza como elementos estruturais aqueles classificados no objeto físico (MP, MA, MT, MH, MS, BU) conforme a arquitetura proposta por [Liu et. al., 98]. Assim, o procedimento utilizado para criar o modelo é o seguinte:

1. Identificar os componentes físicos do sistema de manufatura objeto de estudo de acordo com a classificação acima;

2. Distribuir estes componentes de forma similar ao lay-out da manufatura;

3. Associar estes componentes com elementos estruturais das Redes de Petri conforme o método interpretado apresentado a seguir;

4. Relacionar este componentes através de arcos direcionados, onde cada arco representa uma possível rota a ser assumida pelo fluxo de materiais;

Há algumas restrições ao se executar este processo de modelagem, facilmente compreendidas quando se verifica os elementos que são associados aos lugares e aqueles que são associados às transições.

3.3.1.2. Elementos associados aos lugares

Conforme já dito anteriormente, os elementos que compõem o modelo dos recursos é equivalente aos recursos contidos no objeto físico; destes recursos, alguns são associados a lugares e outros são associados a transições. Aquelles associados aos lugares são os responsáveis pela transformação física dos materiais e pelas situações de “espera” (BU), realizando uma transformação lógica na peça. A Figura 3-5 mostra a classificação e uma representação gráfica para cada um destes recursos associados aos lugares:

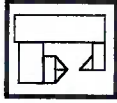
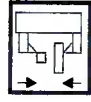

EL.	DESCRIÇÃO
	MP (Material Processor): Estes elementos devem ter a capacidade de processar uma peça como indicado no planejamento do processo.
	MA (Material Assembler): São elementos que realizam a montagem de peças nos sistemas de manufatura.
	BU (Buffer): é formada pelos estoques de matérias primas e pelos magazines de entrada de saída dos equipamentos. O BU possui como principal característica a sua capacidade de armazenamento de peças e palets.

Figura 3-5 Elementos associados aos lugares

Os sistemas de manufatura podem ser obtidos a partir da combinação dos diferentes componentes e da relação entre estes elementos. É importante destacar que cada equipamento ou recurso possui características específicas para sua operacionalização e estas características devem ser consideradas tanto para a

modelagem como para o comportamento dinâmico do sistema, quando ele for compilado para o modelo do sistema de manufatura.

A estes elementos pode-se, ainda, associar modificações das Redes de Petri, tais como, uma capacidade limitada nos lugares que representam BU, ou uma política para entrada de marcas em um dado elemento de processamento.

3.3.1.3. Os elementos associados às transições

Para uma completa descrição dos elementos que compõem os recursos do sistema de manufatura, conforme a arquitetura proposta, fariam faltando os recursos responsáveis pelo transporte, manipulação e estocagem de materiais. Estes elementos realizam transformações lógicas e são aqui representados por transições. A figura abaixo apresenta esta classificação e uma forma gráfica de representar cada um destes elementos:


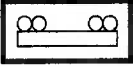
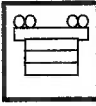
FL.	DESCRIÇÃO
	MIH (Material Handler): Elementos capazes de mover peças / palets de um lugar para outro em uma dada orientação específica.
	MT (Material Transporter): A principal função destas máquinas é a de transportar peças para várias localizações da fábrica.
	MIS (Material Storage): O estocador de materiais é formado por vários tipos de dispositivos de estocagem.

Figura 3-6 Elementos associados às transições.

serão consideradas por um sistema lógico. tanto elementos que compõem o objeto físico (recursos) como propriedades que É importante salientar que este modelo incorpora, por suas características, manipulador e uma unidade de processamento.

mais profunda, pode ser considerado uma estação de trabalho com um buffer, um equipamento é composto, por exemplo, por um manipulador dedicado e, de forma carregamento das peças nas máquinas é automático; mas pode-se dizer que este de tipos específicos de equipamentos, tais como, os equipamentos onde o Esta característica própria do método pode parecer restritiva na modelagem

transporte ou estocagem. de processamento, montagem ou espera, sempre um elemento de manipulação, dos modelos, há a necessidade de se tomar o cuidado de modelar, entre os elementos processamento, montagem e espera são associados a lugares, durante a concepção materiais são representados por transições e os elementos que realizam Como os elementos que realizam transporte, manipulação e estocagem de

modificadas. recursos no chão de fábrica por incorporar características das Redes de Petri possui marcação. Ele somente específica condições e restrições estabelecidas pelos O modelo dos recursos, conforme pode ser observado, é conceitual e não

3.3.1.4. Considerações finais sobre o modelo dos recursos

modificações, de acordo com cada recurso. transição, em um modelo em Redes de Petri, eles podem incorporar características de Como os elementos dados na figura acima são associados à função de

Na concepção dos modelos dos processos há de se destacar que estes devem possuir elementos estruturais específicos para atenderem os requisitos de uma integração a posteriori, sendo estes obtidos através do estudo dos métodos de modelagem acima citados. Além disto, são necessários procedimentos sistematizados para possibilitar a integração entre os dois modelos. Assim, as próximas seções

método Porto [Porto, 90] [Inamasu, 95].

Filho, 98] que também atende os aspectos de processos alternativos ressaltados pelo interpretados de modelagem MFG [Myiagi, 96] e E-MFG [Santos Filho, 93] [Santos Os modelos dos processos serão, então, uma variação dos métodos

colocada por estes métodos no momento da realização dos modelos dos processos.

uma nova visão antes não contemplada e mantém-se a especificidade funcional 2, conforme já destacado, são amplamente empregados. Neste trabalho, acrescenta-se

Os métodos MFG, E-MFG, PFS, PFS/MFG e Porto apresentados no capítulo

processo de fabricação.

suas contribuições em termos de realização de projeto e análise do controle e do

dos processos representando as operações e atividades a serem realizadas e utilizando

Neste trabalho, pretende-se manter a abordagem funcional para os modelos

estrutura de produção.

operações para cada processo e, assim, da rota percorrida pela peça em uma dada

método proposto, é o plano macroscópico, onde há a definição da sequência de

O objetivo dos modelos dos processos, no nível de detalhe pretendido pelo

3.3.2.1. Considerações Preliminares

3.3.2. OS MODELOS DOS PROCESSOS

tratarão tanto da questão dos elementos estruturais para se modelar os processos como dos procedimentos utilizados para sua realização.

3.3.2.2. Procedimento utilizado pelos métodos funcionais de modelagem

No capítulo 2 é apresentado o método proposto em [Zhou et. al., 95] para modelagem baseada em Redes de Petri e estes procedimentos são utilizados pelas redes interpretadas. De uma forma resumida, ao considerar apenas um processo, pode-se dizer que há a definição de uma sequência de operações e a cada operação é associado um recurso físico para sua realização. A seguir serão apresentados e analisados alguns modelos que utilizam tanto o MFG e o E-MFG como os procedimentos do método Porto (note que estes modelos são similares ao do Capítulo 2).

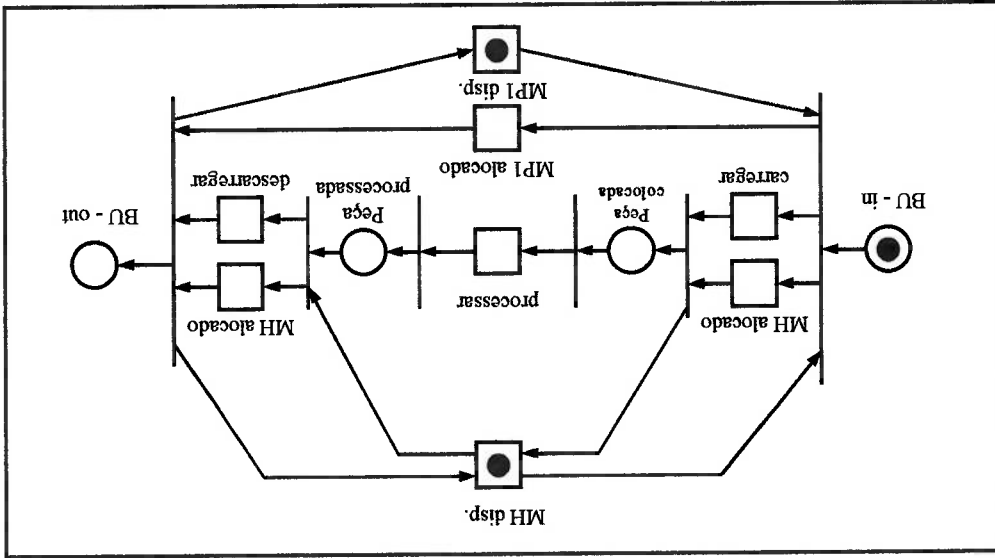


Figura 3-7 Modelo de um processo em MFG.

O modelo da Figura 3-7 representa o seguinte processo: estando MPI e MH disponíveis e havendo uma peça em BU-in, então, o MH pode realizar a operação de carregamento (nota-se que ao iniciar esta operação, MPI já será alocado); após sua realização, MH é disponibilizado novamente e, estando a peça pronta, é realizado por

MP1 o processamento, após o qual a peça é transportada por MH para o Bu-out e, tanto MH são como MP são, então, disponibilizados.

No método Porto o processo de fabricação é descrito por dois modelos, sendo que o primeiro é um modelo básico geral, onde só se consideram as operações que provocam uma mudança no estado tecnológico da peça, e o segundo é um modelo detalhado que define todas as atividades a serem realizadas no sistema de manufatura, incluindo aquelas que não provocam a mudança no estado tecnológico da peça. A Figura 3-8 abaixo mostra um exemplo (modelo geral) dado pelo método de Porto para um processo de fabricação.

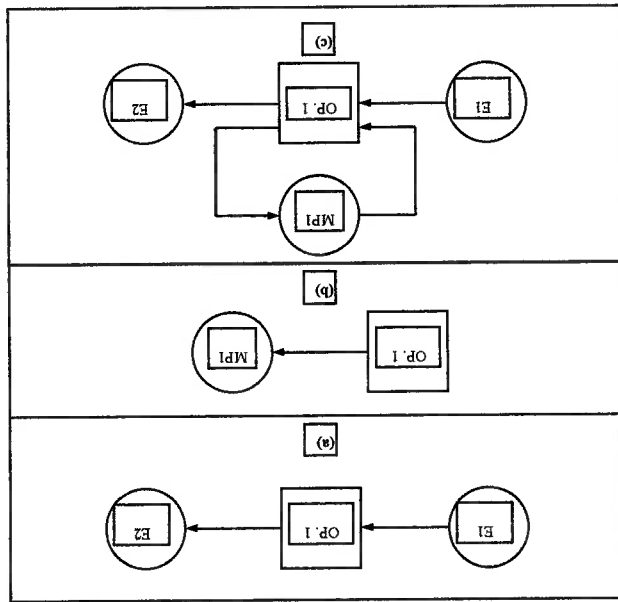


Figura 3-8 - Modelo de processo com: a) op.; b) maq. resp. pela op.; c) op. e maq. responsáveis.

A Figura 3-8 mostra a representação de um processo através de seu modelo geral, onde em (a) tem-se que apenas a OP.1 é necessária para provocar a mudança no estado tecnológico da peça; já em (b) tem-se que apenas uma MP1 pode realizá-lo e, em (c) tem-se que a mudança de estado tecnológico é produzida pela OP.1

realizado em MP1. É importante notar que ao transformar este modelo em uma Rede de Petri estarão marcados inicialmente os lugares E1 e MP1.

3.3.2.3. O modelo do processo

Conforme pode-se observar nos procedimentos tradicionais de modelagem há duas entidades relevantes para se modelar o processo: operações e recursos disponíveis responsáveis pela realização de operações.

Segundo a filosofia de modelagem proposta, o modelo do processo deverá definir a rota de uma peça em um dado sistema de manufatura; assim, será considerado o sequenciamento de operações a ser realizada em uma dada estrutura de manufatura.

Conforme pode ser verificado no modelo de relacionamento entre os recursos, os elementos de processamento e de espera são representados por lugares e os elementos de transporte por transições. No método de modelagem proposto, isto significa que somente após a ocorrência de atividades de transporte é que ocorrem, efetivamente, as mudanças de cores. No modelo do processo cada elemento deverá representar o par (recurso, operação), no caso dos buffers (recurso, estado tecnológico) e os elementos de transporte (recurso, atividade). Por estas informações é possível notar a existência de alguns elementos estruturais básicos compostos pelo par (recurso, atividade), mantendo a associação dos recursos aos elementos estruturais das Redes de Petri (lugares e transições). Os arcos direcionados indicam a direção dos fluxos, mantendo as características das Redes de Petri.

Na Figura a seguir tem-se um exemplo de um modelo de processo para uma estrutura de manufatura conforme modelo de relacionamento dos recursos dado pela

Figura 3-3:

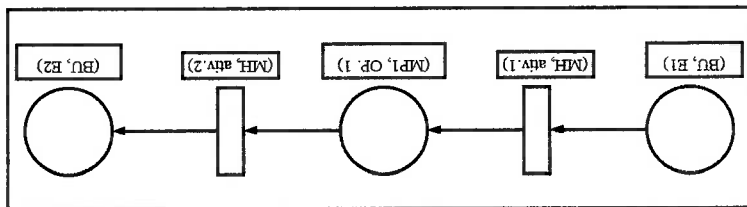


Figura 3-9 Exemplo de modelo do processo.

O modelo da Figura 3-9 pode ser interpretado da seguinte forma: inicialmente

a peça (matéria prima) deverá se encontrar em BU (elemento de espera) e estar no estado tecnológico E1; em seguida, ela deverá sofrer a ativ. 1 (colocar adequadamente a peça em MP1) realizada por MH, após a qual deverá sofrer a OP. 1 (processar a peça) e, então, ser descarregada adequadamente de MP1 e colocada no BU por meio de MH (ativ. 2). É importante aqui salientar que este tipo de construção é coerente tanto com os métodos MFG e E-MFG quanto com o método Porto.

O modelo representado pela Figura 3-9 é conceitual e reflete apenas características estruturais da rede, representando apenas a rota da peça no sistema de manufatura. O modelo do processo reflete apenas informações a serem consideradas no modelo completo do sistema de manufatura.

3.3.2.4. Considerações finais

Segundo a sistemática de modelagem, para cada processo deve ser concebido um modelo individualizado. O conjunto de todos os modelos dos processos deverá servir de base para geração de um sistema lógico, que define o comportamento e o fluxo de peça na estrutura de manufatura.

A presente seção trata da questão metodológica para a geração dos modelos completos do sistema de manufatura. O modelo do sistema de manufatura será gerado partindo-se do Modelo de Relacionamento entre os Recursos, de onde deverá sair a estrutura da Rede: lugares, transições e arcos orientados. As marcas, no modelo da manufatura, deverão representar as peças; desta forma, surge a proposta de relacionar a marca a um elemento específico da manufatura, o que não ocorre nos métodos interpretados apresentados no capítulo 2. Já os modelos dos processos determinarão a dinâmica do sistema.

3.4. MODELO DO SISTEMA DE MANUFATURA

O modelo de cada processo aqui concebido é um plano macroscópico que traz a rota a ser percorrida por um tipo específico de peça, em um dado sistema de manufatura, com a finalidade de executá-la convenientemente. Em cada um dos elementos estruturais dos modelos dos processos fica caracterizada a atividade ou operação e o elemento que é fisicamente responsável por ela. Assim, cada nó é definido pelo par (recurso, atividade).

As atividades devem ocorrer para um determinado modelo de processo em um único recurso; uma outra observação diz respeito ao fato da flexibilidade do processo conforme destaca [Porto, 90] & [Inamasu, 95], onde em uma peça, no seu plano de processo, as atividades podem ser realizadas alternativamente em um recurso ou em outro. Essa possibilidade poderá ser prevista no modelo do processo, flexibilizando a sua realização em um dado sistema de manufatura.

É importante destacar, como visto anteriormente, que o estado tecnológico da peça evolui com a realização de operações e atividades. Esta mudança pode ser física, quando realizada por um equipamento de processamento ou montagem, ou lógica, quando realizada por um equipamento de transporte ou estivar aguardando em um *buffer*.

Os modelos dos processos determinam a dinâmica do fluxo de materiais no modelo do sistema de manufatura, e, com a mudança de estado tecnológico da peça, ocorre a mudança da característica da marca. Assim, duas peças idênticas, que possuem processos idênticos podem estar em "estados" tecnológicos distintos.

3.4.1. ELEMENTOS ASSOCIADOS ÀS MARCAS





EL.	DESCRICAÇÃO
	PR (parts): As peças são os elementos que sofrem as transformações.
	TO (Tools): As ferramentas são elementos que são anexados aos recursos (equipamentos) para se executar uma determinada tarefa.
	PA (Pallets): As peças (ou ferramentas) podem ser colocadas em pallets (PA), podendo ser deslocados no chão de fábrica. O pallet possui uma determinada capacidade.
	PR^{as} (Assembled Part): As peças montadas são compostas por várias peças simples que devem ser colocadas em uma determinada sequência.

Figura 3-10 Elementos do sistema de manufatura associados às marca

A Figura 3-10 mostra a existência de 4 elementos do sistema de manufatura que podem ser associados a marca. Estes elementos são as PR (peças), TO (ferramentas), PA (*pallets*) e as PR^{as} (peças resultantes de operações de montagem),

sendo que podem ser considerados marcas simples PR e TO e marcas compostas o PA e o PR^{as}.

O PR representa peças simples que possuem como característica principal o fato de sofrerem transformações em seu estado tecnológico, já os elementos do tipo TO são as ferramentas utilizadas pelos diversos equipamentos.

Um *pallet* é um elemento onde as peças são colocadas para, em seguida, serem transportadas, servindo para o abastecimento de peças nas estações de trabalho e para fazer a estocagem das peças já finalizadas. Assim, pode ser utilizado ou só para abastecer as estações de trabalho ou só para retirar as peças prontas das estações de trabalho ou, ainda, para abastecer a estação e aguardar as peças prontas.

A utilização dos *pallets* depende da política de manipulação e transporte de materiais adotada. O destino do *pallet* deve ser o destino das peças que estão nele e, em geral, após estarem vazios se desloca para outras localizações ou aguarda até estarem novamente completos com peças acabadas. A seguir são exemplificadas algumas políticas para manipulação de *pallets*:

- Os *pallets* que só abastecem as estações chegam completos e permanecem nelas até que todas as peças sejam retiradas.
- Os *pallets* que só retiram as peças das estações deverão chegar nas estações sem peças e deverão ser retirados das estações somente quando estiverem completos.
- Os *pallets* que abastecem e depois retiram as peças das estações deverão chegar completos e permanecer na estação até que todas as peças sejam processadas e novamente preencham o *pallet*.

Em uma montagem, a peça resultante é composta por diversas peças individuais, sendo que, após a operação de montagem, haverá um novo produto que passaria a ser considerado uma nova peça individual, chamada de peça individual composta. Assim, uma peça (marca) individual composta é resultado da montagem de várias peças (marcas) individuais originando um novo produto que deverá possuir a sua rota, assim como as peças individuais.

3.4.2. GERAÇÃO DOS MODELOS DA MANUFATURA

Com o objetivo de contemplar os paradigmas de modelagem do método proposto considerou-se duas alternativas inspiradas nas Redes de Petri Coloridas para a geração dos modelos completos do sistema de manufatura:

1.^a Desenvolve-se um método para gerar o modelo gráfico completo do sistema de manufatura em Redes de Petri Coloridas segundo a sua forma original acrescida da possibilidade de limitar a capacidade de lugares, determinados pela características dos elementos de processamento, montagem ou espera. Já as políticas de manipulação e transporte determinam as condições para os disparos das etapas habituais, enquanto que os modelos dos processos determinam as sentenças expressas nos arcos e as funções de condução vinculadas às transições.

2.^a Desenvolve-se um método para gerar, diretamente, as expressões algébricas que formalizam o modelo completo do sistema de manufatura, concebidos segundo a abordagem metodológica proposta. Com o modelo analítico há uma interação maior, possibilitando ampliar o universo de modelagem do primeiro método e intervir nas estratégias e lógicas dos sistemas de controle.

3.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foi destacado o método de modelagem proposto, onde são executadas duas visões de modelagem: uma abrangendo o relacionamento entre os recursos e a outra abrangendo a funcionalidade do sistema através dos modelos dos processos.

Com esta nova concepção procurou-se desenvolver uma sistemática de modelagem partindo-se do relacionamento entre os recursos físicos, ao contrário da maneira executada pelos métodos interpretados de modelagem que partem do sequenciamento de operações e atividades.

O modelo de relacionamento entre os recursos é similar a um *lay-out*, sendo facilmente desenvolvido e interpretado mesmo por aqueles que não são especialistas em modelagem. Já os modelos dos processos são funcionais e desenvolvidos de acordo com o modelo de relacionamento entre os recursos. Nos modelos dos processos cada nó é definido pelo par (recurso, atividade), sendo que esta sequência define a rota pela qual a peça flui.

Destes dois modelos é, então, gerado um modelo do sistema de manufatura, no qual os elementos estruturais básicos (lugares, transições e arcos) são trazidos do modelo de relacionamento entre os recursos, as peças são representadas por marcas e dos modelos dos processos é definido o comportamento dinâmico do sistema. Nos capítulos seguintes serão apresentadas as alternativas desenvolvidas para se gerar o modelo completo do sistema de manufatura.

Neste Capítulo é desenvolvido um método, baseado nas Redes de Petri Coloridas, para geração do modelo completo do sistema de manufatura, compilado a partir do modelo de relacionamento entre os recursos e dos modelos dos processos. Os elementos estruturais básicos são concebidos de acordo com o modelo de relacionamento entre os recursos, as peças são representadas por marcas, onde o comportamento de uma marca é definido a partir de equações vinculadas aos arcos, concebidas a partir do modelo do processo de cada peça. Inicialmente apresentam-se os aspectos teóricos das CPN, e, em seguida, a sistemática utilizada para geração dos modelos.

4.1. INTRODUÇÃO

4. GERAÇÃO DOS MODELOS DA MANUFATURA EM CPN

4.2. REDES DE PETRI COLORIDAS OU (COLOURED PETRI NETS - CPN)

Redes de Petri Coloridas, conforme pode ser visto no Capítulo 2, constitui

uma das abordagens para se conseguir modelos reduzidos em Redes de Petri através da associação de valores aos arcos, transições e marcas. Redes Coloridas são, portanto, redes tradicionais, descritas de modo condensado, não acarretando nenhuma alteração em suas propriedades sob o ponto de vista de análise. A seguir teremos a definição dos *multi-sets*, da estrutura e do comportamento das Redes de Petri Coloridas segundo [Jensen, 96]. Entretanto, será introduzido o conceito de capacidade de marcas aos lugares, por ser característica fundamental para contemplar os requisitos de modelagem do método proposto.

4.2.1. DEFINIÇÃO DE MULTI-SETS

A definição de *multi-set* consiste em determinar a quantidade de vezes que um elemento de um determinado tipo aparece em um conjunto.

Definição 4-1: Um *multi-set* m , de um conjunto S , é uma função $m \in [S \rightarrow \mathbb{N}]$. O não negativo inteiro $m(s) \in \mathbb{N}$ é o número de vezes que aparece o elemento s no *multi-set* m . Usualmente representado pela soma formal:

$$\sum m(s) \cdot s; \text{ onde } s \in S.$$

Definição 4-2: Adição, multiplicação escalar, comparação e tipo de *multi-sets* são definidos da seguinte forma para todo $m, m_1, m_2 \in S_{MS}$ e todo $n \in \mathbb{N}$:

$$(i) \quad m_1 + m_2 = \sum (m_1(s) + m_2(s)) \cdot s \quad (\text{adição});$$

- O vínculo de um conjunto de variáveis, \forall – associa a cada variável $v \in V$ um elemento $b(v) \in Type(v)$.
 - O conjunto de variáveis em uma expressão, $expr$ – denotado por $Var(expr)$.
 - O Tipo de uma expressão, $expr$ – denotado por $Type(expr)$.
 - O Tipo de uma variável, v - denotado por $Type(v)$.
- Elementos de um tipo, T . O conjunto de todos elementos em T é denotado pelo tipo chamado somente de T .
- (semântica \leftarrow sintaxe):

tem como finalidade possibilitar uma interpretação não ambígua da seguinte forma

A semântica utilizada para se definir a estrutura das Redes de Petri Coloridas

4.2.2. ESTRUTURA DA CPN

vezes no *multi-set* m , há uma adição para cada uma das vezes.

denotar a soma de cada elemento de m . Quando um elemento de S aparece algumas

$(R, +)$ e uma função $F \in [S \rightarrow R]$ dada. Usa-se a soma: $\sum F(s)$ onde $s \in m$ para

Definição 4-3: Tem-se um *multi-set* finito $m \in S_{MS}$, um monóide comutativo

- (iv) $|m| = \sum m(s)$ (Tipo).
- $m_1 \leq m_2 = \forall s \in S: m_1(s) \leq m_2(s)$
- (iii) $m_1 \neq m_2 = \exists s \in S: m_1(s) \neq m_2(s)$ (comparação);
- (ii) $n * m = \sum (n * m(s))s$ (multiplicação escalar);

- O valor obtido pelo cálculo de uma expressão, expr , em um vínculo, b – denotado por $\text{expr} \langle b \rangle$. $\text{Var}(\text{expr})$ é requerido para ser um subconjunto de variáveis de b , e o cálculo é feito pela substituição de cada variável $v \in \text{Var}(\text{expr})$ no valor $b(v) \in \text{Type}(v)$ determinado pelo vínculo.

Definição 4-4: Uma rede de Petri Colorida é uma 10-upla $(\Sigma, P, T, A, N, C, K, G, E, I)$ onde:

Σ - É um conjunto finito de cores. O conjunto de cores determina o tipo (*Type*), operações e funções que podem ser usadas nas inscrições da rede.

P - É um conjunto finito de lugares.

T - É um conjunto finito de transições.

A - É um número finito de arcos tal que:

$$\bullet \quad P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset.$$

N - É uma função nó. A função nó (N) mapeia cada arco em um par onde o primeiro elemento é a origem do nó e o segundo é destino do nó. Os dois nós tem de ser diferentes (um lugar e uma transição). Assim, define-se arcos como um conjunto separado de nós e não como um subconjunto de $P \times T \cup T \times P$.

C - É uma função denominada função conjunto de cores que associa a cada lugar p de P uma cor pertencente a Σ , mapeando cada lugar, p , para um conjunto de cores $C(p)$. Intuitivamente, isto significa que cada marca (*token*) em p deve pertencer ao tipo $C(p)$.

$$\bullet \quad C : P \rightarrow \Sigma.$$

K - É uma função capacidade, que associa a cada lugar p de P um valor inteiro K pertencente a N , mapeando cada lugar, p , para um número natural $K(p)$. Assim, há uma limitação na quantidade de marcas que pode haver em um lugar p .

- $K: P \rightarrow N$.

G - É uma função, denominada função de condução (*guard function*). A *guard function* G mapeia cada transição t a uma expressão do tipo booleana, por ex., um predicado. Entretanto, toda variável em $G(t)$ deve ter tipos que pertençam a Z . G é definida a partir de T em expressões tal que:

$$\forall t \in T : [Type(G(t)) = B \vee Type(Var(G(t))) \subseteq Z].$$

E - É uma função expressa no arco. A função E expressa no arco mapeia cada arco, a , com uma expressão que deve ser do tipo $C(p(a))_{ms}$. Isto significa que o valor de cada expressão deve produzir um *multi-set* no conjunto de cores que é anexado ao correspondente lugar. E é definida a partir de A em expressões tal que:

$$\forall a \in A : [Type(E(a)) = C(p(a))_{ms} \vee Type(Var(E(a))) \subseteq Z] \text{ onde } p(a) \text{ é lugar de } N(a).$$

I - É uma função de inicialização. É definida a partir de P em expressões fechadas tal que:

$$\forall p \in P : [Type(I(p)) = C(p)_{ms}].$$

Em adição aos conceitos introduzidos na Definição 4-4, usa-se $X = P \cup T$ para denotar o conjunto de todos os nós. Assim, define-se, a seguir, um número de funções descrevendo as relações entre os elementos vizinhos da estrutura da rede:

- $p \in [A \rightarrow P]$ mapaia cada arco, a , para lugares de $N(a)$.

- $t \in [A \rightarrow T]$ mapaia cada arco, a , para transiões de $N(a)$.

- $s \in [A \rightarrow X]$ mapaia cada arco, a , para a origem de a .

- $d \in [A \rightarrow X]$ mapaia cada arco, a , para o destino de a .

- $A \in [(P \times T \cup T \times P) \rightarrow A_S]$ mapaia cada par ordenado de nós (x_1, x_2)

para o conjunto dos arcos conectados, por ex., os arcos que tem o primeiro

nó como origem e o segundo como destino: $A(x_1, x_2) = \{a \in A \mid N(a) =$

$(x_1, x_2)\}$.

- $A \in [X \rightarrow A_S]$ mapaia cada nó x para o conjunto dos arcos ao seu redor,

por ex., os arcos que tem x como origem ou destino:

$$A(x) = \{a \in A \mid \exists x' \in X: [N(a) = (x, x') \vee N(a) = (x', x)]\}$$

- $In \in [X \rightarrow X_S]$ mapaia cada nó x no conjunto dos nós de entrada, por ex.,

os nós que são conectados a x por um arco de entrada:

$$In(x) = \{x' \in X \mid \exists a \in A: N(a) = (x', x)\}.$$

- $Out \in [X \rightarrow X_S]$ mapaia cada nó x no conjunto de seus nós de saída, por

ex., os nós que são conectados a x por um arco de saída:

$$Out(x) = \{x' \in X \mid \exists a \in A: N(a) = (x, x')\}.$$

- $X \in [X \rightarrow X_S]$ mapaia cada nó x para o conjunto dos nós ao seu redor, por

ex., os nós que são conectados a x por um arco:

$$X(x) = \{x' \in X \mid \exists a \in A: [N(a) = (x, x') \vee N(a) = (x', x)]\}.$$

4.2.3. COMPORTAMENTO DA CPN

Definida a estrutura da CPN será considerado o seu comportamento,

introduzindo a seguinte notação:

$$\bullet t \in T: \text{Var}(t) = \{v \mid v \in \text{Var}(G(t)) \vee \exists a \in A(t): v \in \text{Var}(E(a))\}.$$

$$\bullet (x_1, x_2) \in (P \times T \cup T \times P): E(x_1, x_2) = \Sigma E(a) \text{ onde } a \in A(x_1, x_2).$$

$\text{Var}(t)$ é chamado de conjunto de variáveis de t enquanto que $E(x_1, x_2)$ é

chamado de expressão de (x_1, x_2) . A somatória indica a adição das expressões e é bem

definida porque toda expressão participante tem um tipo de multi-conjunto (*multi-set*)

type) comum. A seguir tem-se as definições para se determinar o comportamento da

CPN.

Definição 4-5: Um vínculo de uma transição t é uma função b definida em

$\text{Var}(t)$, tal que:

$$\forall v \in \text{Var}(t): b(v) \in \text{Type}(v).$$

$$G(t) \langle b \rangle.$$

Definição 4-6: Uma marca (*token element*) é um par (p, c) onde $p \in P$ e $c \in$

$C(p)$, enquanto um elemento vinculado (*binding element*) é um par (t, b) onde $t \in T$ e

$b \in B(t)$. O conjunto de todas as marcas (*token elements*) é denotado por TE ,

enquanto o conjunto de todos os elementos vinculados é denotado por BE .

Definição 4-7: Uma marcação é um multi-conjunto (*multi-set*) em TE enquanto uma etapa é um não vazio e finito multi-conjunto sobre BE. A marcação inicial M_0 é uma marcação obtida pelo cálculo da expressão de inicialização:

$$\forall (p, c) \in TE: M_0(p, c) = (I(p))(c).$$

O conjunto de todas as marcações e etapas são denotadas por M e Y respectivamente.

Definição 4-8: Em cada lugar p há uma marcação (um multi-conjunto). A soma dos coeficientes ($m(s)$) do *multi-set* existente em cada lugar p de P resulta em um valor inteiro Q pertencente a \mathbb{N} . $Q(p)$ associa este valor inteiro a cada lugar. É importante observar que $Q(p) \leq K(p)$.

Neste trabalho desenvolveu-se a função $Q(p)$ com a finalidade de contar o número de marcas existentes em cada lugar independentemente de sua cor.

Definição 4-9: Uma etapa Y é habilitada em uma marcação M se e somente se as seguintes propriedades forem satisfeitas:

$$1. \forall p \in P: \sum E(p, t) \leq M(p), \text{ onde } (t, b) \in Y;$$

$$2. \forall p \in P: Q(M(p) - \sum E(p, t) \leq b + \sum E(t, p) \leq K(p), \text{ onde } (t, b) \in Y;$$

Na condição 1 tem-se que para todo arco $In(p, t)$ de entrada da transição t , o resultado da sentença expressa a cada um destes arcos deve ser um *multi-set* pertencente (menor) ao *multi-set* existente em cada lugar p de origem de cada arco.

Na condição 2 tem-se que a soma das marcas existentes em cada lugar $Q(p)$ após a ocorrência de uma etapa deve ser menor que a capacidade máxima $K(p)$ de marcas que pode existir em cada lugar.

Obs. 1: Caso a sentença expressa ao arco não seja coerente com a função de condução (*guard function*), a transição não é habilitada.

Obs. 2: Nas Redes de Petri Coloridas, uma transição pode possuir mais que uma etapa habilitada, alternativamente, caso sejam satisfeitas as condições de habilitação.

Definição 4-10: Quando uma etapa Y é habilitada em uma marcação M_1 , esta etapa pode ocorrer, mudando a marcação M_1 para outra marcação M_2 , definida por:

$$\forall p \in P: M_2(p) = (M_1(p) - \sum E(p, t) \langle b \rangle + \sum E(t, p) \langle b \rangle).$$

Na primeira soma tem-se as marcas removidas, enquanto a segunda é chamada de marcas adicionadas. Entretanto, diz-se que M_2 é diretamente alcançável por M_1 pela ocorrência da etapa Y , a qual também denota-se por: $M_1[Y] > M_2$.

Definição 4-11: Uma sequência finita de ocorrências é uma sequência de marcações e etapas:

$$M_1[Y_1] > M_2[Y_2] > M_3 \dots M_n[Y_n] > M_{n+1}; \text{ onde } n \in \mathbb{N}, \text{ e } M_i[Y_i] > M_{i+1} \text{ para todo } i \in \mathbb{N}.$$

A marcação M_1 é chamada de marcação inicial da sequência ocorrida, enquanto a marcação M_{n+1} é chamada de marcação final. O não negativo inteiro n é chamado de número de etapas na sequência ocorrida, ou a extensão.

A presente seção trata da questão metodológica para a geração dos modelos completos do sistema de manufatura. O formalismo utilizado é o das Redes de Petri Coloridas. O modelo do sistema de manufatura será gerado partindo-se do modelo de relacionamento entre os recursos que definem lugares, transições e arcos orientados, já os modelos dos processos definem as equações booleanas vinculadas aos arcos e transições e as marcas que deverão representar as peças.

É importante destacar que o estado tecnológico da peça evolui com a realização de operações e atividades. Esta mudança do estado tecnológico pode ser física, quando realizada por um equipamento de processamento ou montagem ou lógica quando realizada por um equipamento de transporte ou estiver aguardando em um elemento de espera (*buffer*).

4.3. GERAÇÃO DO MODELO DA MANUFATURA EM CPN

Também diz-se que M' é alcançável de M'' em n etapas. O conjunto das marcas alcançáveis de M' são denotadas por $[M']$.

$$M' [Y_1 Y_2 \dots Y_n > M''$$

etapas $Y_1 Y_2 \dots Y_n$ tal que:

Definição 4-12: Uma marcação M' é alcançável de uma marcação M'' se e somente se existe uma sequência finita de ocorrências tendo M' como marcação inicial e M'' como marcação final, por ex., se para algum $n \in \mathbb{N}$ há uma sequência de

O modelo do processo de fabricação de cada peça determina a sua dinâmica no modelo do sistema de manufatura, assim como a mudança da característica (cor) da marca.

4.3.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA BÁSICA DA REDE

Os elementos estruturais básicos são aqueles definidos a partir do modelo de relacionamento entre os recursos físicos. Com o objetivo de gerar o modelo do sistema de manufatura, de acordo com a abordagem adotada no método de modelagem e análise de sistemas de manufatura proposto, inicialmente associam-se os elementos estruturais básicos das Redes de Petri Coloridas com componentes dos sistemas de manufatura. A seguir apresenta-se os elementos estruturais das redes de Petri que saem do modelo de relacionamento entre os recursos:

- Processadores de Materiais (MP), Elementos de Montagem de Materiais (MA) e *Buffers* (BU) são interpretados como lugares, formando o conjunto finito de lugares;

- A cada elemento, conforme o modelo dos recursos, é definida uma limitação dada pela quantidade máxima de peças que pode haver em cada recurso (MP, MA ou BU). Assim, associa-se um valor $K(p) \in \mathbb{N}$ a cada um destes elementos interpretados como lugares.

- Manipuladores de Materiais (MH), Transportadores de Materiais (MT) e Dispositivos de Armazenagem Automática de Materiais (MP) são interpretados como transições, formando o conjunto finito de transições;

Os modelos dos processos são conceituais, onde a identificação de cada lugar é dada por um par (recurso, operação) ou (recurso, estado tecnológico) e cada transição por um par (recurso, atividade). Assumindo a hipótese que uma operação

4.3.2.1. Diagrama "cor X lugar"

Com a finalidade de auxiliar a definição dos demais elementos, a partir dos modelos dos processos, foram desenvolvidos 2 tipos de diagramas, onde no primeiro relaciona-se "cor X lugar" e, no segundo, relaciona-se "cor X arco". Estes diagramas são feitos para o modelo do processo de cada peça.

4.3.2. DIAGRAMAS DE AUXÍLIO

A seguir define-se os seguintes elementos estruturais: Σ , C(p), E(a), G(t) e a função de inicialização I(p). Para tanto, são desenvolvidos, inspirados na ideia das árvores de alcançabilidade e das matrizes de incidência, alguns diagramas para auxiliar na definição destes elementos.

O método propõe que as marcas representem peças e que o fluxo de marcas no modelo seja equivalente ao fluxo de materiais pelo sistema de manufatura. Para se definir os demais elementos estruturais da rede há a necessidade de levar em consideração as características operativas e a política adotada por cada um dos elementos de transporte.

• Os arcos, no modelo de relacionamento entre os recursos, representam as rotas possíveis para o fluxo de materiais. Assim, são diretamente interpretados, no modelo em rede, como arcos, mostrando sua origem e seu destino sem, no entanto, haver nenhuma sentença expressa.

ou um estado tecnológico ou uma atividade nunca é igual a outra, qualquer que seja o processo, pode-se dizer que o segundo elemento do par é sempre único. No modelo completo do sistema de manufatura cada um destes pares representa a associação de uma cor a um lugar ou de uma etapa a uma transição, sendo esta a função do diagrama "cor X lugar" para cada processo.

O diagrama do tipo "cor X lugar" relaciona as cores que podem existir em cada lugar e as etapas definidas por cada transição, no modelo completo do sistema de manufatura. O desenvolvimento deste diagrama consiste em determinar a árvore de alcançabilidade, no modelo do sistema de manufatura, para cada processo, considerando-o como o único a ser realizado. A Figura 4-1 mostra a maneira de obtenção do diagrama "cor X lugar" a partir do modelo do processo em um sistema de manufatura composto pelos lugares [P1, P2, P3] e pela transição t1.

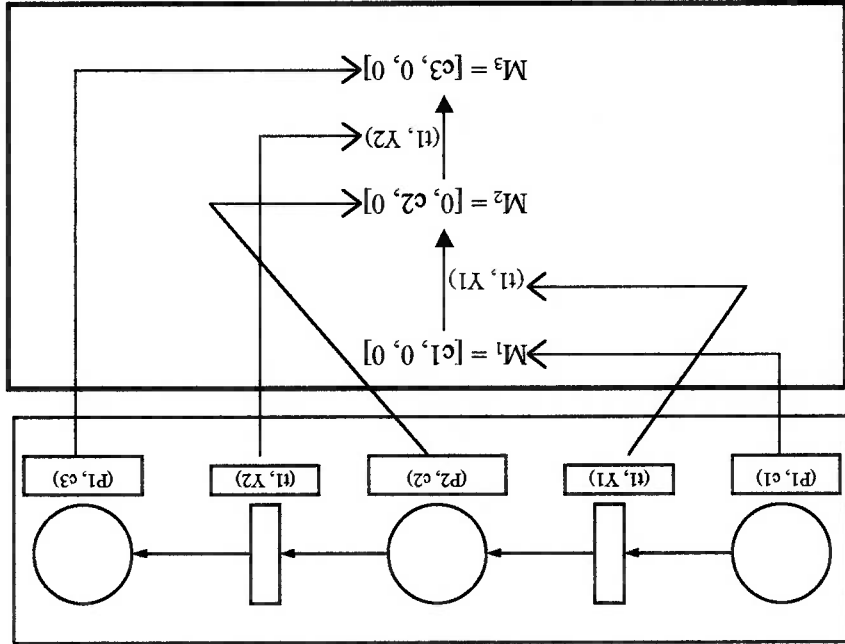


Figura 4-1 Diagrama associado cores aos lugares, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).

No diagrama da Figura 4-1 os lugares são dados por P1, P2 e P3 e as cores são c_1, c_2, c_3 . O diagrama indica, para o processo da peça PR, que inicialmente tem-se c_1 em P1, em seguida, ocorrendo a etapa Y_1 de t1, c_2 em P2 e, por fim, com a ocorrência da etapa Y_2 de t1, c_3 em P1.

Além dos diagramas “cor X lugar” desenvolvidos para cada processo, pode-se fazer um diagrama (tipo matriz) resultado da “soma” dos diagramas para todos os processos, onde as colunas representam todos os lugares, as linhas todas as marcações e, para cada marcação relaciona-se a cor ao lugar. A Figura 4-2 define o diagrama completo “cor X lugar” para o exemplo.

	P1	P2	P3
M_1	c_1	0	0
M_2	0	c_2	0
M_3	c_3	0	0

Figura 4-2 Diagrama com todas as relações de cores a lugares.

4.3.2.2. Diagrama “cor X arco”

Para a definição dos diagramas “cor X arco” são feitas as seguintes considerações:

1. O diagrama “cor X lugar” associa cada cor a um lugar e cada seta é uma etapa, determinando uma sequência de marcações, de acordo com cada processo;

2. Um determinado nó definido como (p_x, t) , pertencente a $P \times T$, $\ln(p_x, t, c_1)$ deve possuir uma cor $c_1 \in C(p_x)$ para ser não vazio;

1. O diagrama (ou matriz) “cor X arco” é definido por uma matriz $A^- (P_m \times Y)$, onde P_m é conjunto dos lugares de entrada e Y as etapas (transição de saída), e, por uma matriz $A^+ (Y \times P_{out})$, onde P_{out} são os lugares de saída e Y as etapas (transição de entrada);

Segundo as considerações acima, e a abordagem para modelagem proposta, as cores são relacionadas aos arcos segundo as seguintes regras:

No diagrama A^+ , que apresenta as cores assumidas pelas expressões dos arcos de saída, as colunas representam os lugares de destino do arco e as linhas as etapas (transição de origem). A cor é indicada pela coordenada (lugar, etapa).

No diagrama A^- , que apresenta as cores assumidas pelas sentenças dos arcos de entrada, as colunas representam os lugares de origem do arco e as linhas as etapas (transição de destino). A cor é indicada pela coordenada (lugar, etapa).

Partindo-se destas considerações iniciais é possível gerar os diagramas “cor X arco”, onde associa-se a cada arco as cores que podem ser nele expressas. Para cada processo, gera-se um diagrama para os arcos de entrada e um para os arcos de saída.

4. A ocorrência de uma etapa implica, conforme Definição 4-10, retirar marcas dos lugares de entrada das transições e adicionar marcas nos lugares de saída das transições, segundo expressões vinculadas aos arcos. Sabe-se, também que o número de etapas é igual ao número de marcações menos 1, conforme Definição 4-11.

3. Um determinado nó definido como (t_i, p_z) , pertencente a $T \times P$, Out (t_i, p_z, c_z) deve possuir uma cor $c_z \in C (p_z)$ para ser não vazio;

2. Os lugares são as colunas da matriz "cor X arco";

3. As etapas são as linhas da matriz "cor X arco". O número de etapas é igual ao número de marcações menos um;

4. Para obter a matriz A^- aplica-se a seguinte regra: vetor etapa $Y_n =$ vetor marcação M_n dada pelo diagrama "cor X lugar" (árvore de

alcangabilidade);

5. Para obter a matriz A^+ aplica-se a seguinte regra: vetor etapa $Y_n =$ vetor

marcação M_{n+1} , sendo M_{n+1} diretamente alcançável por M_n pela ocorrência

da etapa Y_n , conforme estiver definido no diagrama "cor X lugar" para o

processo.

A Figura 4-3 fornece a maneira para montagem do diagrama "cor X arco";

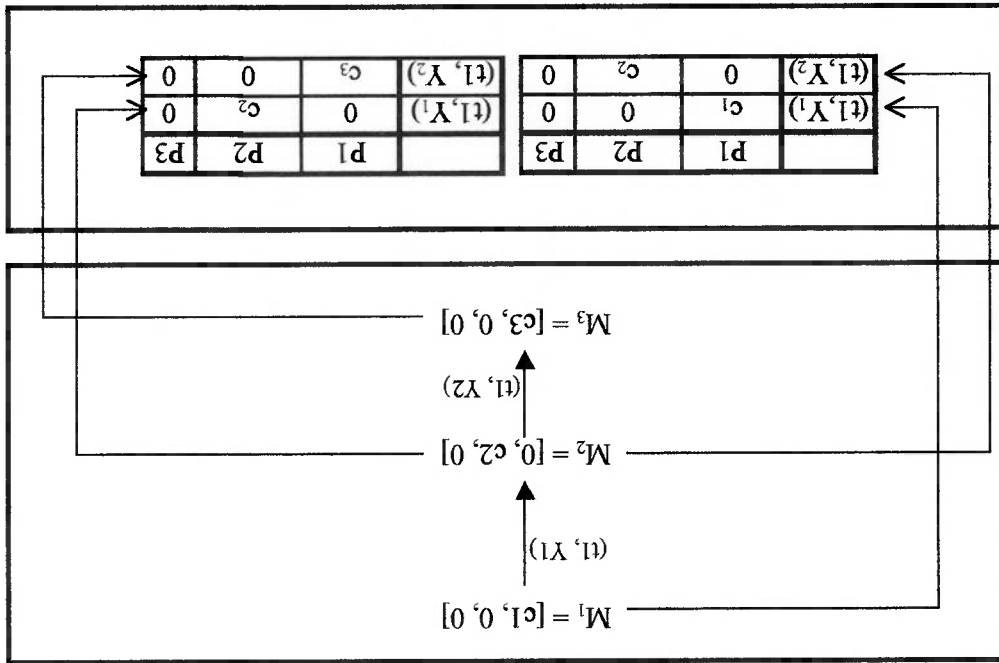


Figura 4-3 Diagramas de associação de cores aos arcos, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).

O diagrama exemplo da Figura 4-3 relaciona cor X arco segundo as regras descritas anteriormente. O diagrama à esquerda dá as cores associadas aos arcos de entrada das etapas Y_1 e Y_2 e o diagrama da direita dá as cores associadas aos arcos de saída das etapas Y_1 e Y_2 da transição t1.

4.3.3. DEFININDO OS ELEMENTOS BASEADOS NOS DIAGRAMAS DE AUXILIO

4.3.3.1. Definindo $C(p)$ e Σ

Nos modelos dos processos, dada a sua característica de identificar cada lugar pelo par, conforme descrito acima, são utilizados para definir, no modelo completo do sistema de manufatura, um lugar (p) e uma cor (c) associada a este lugar. O mapeamento de $C(p)$ é feito quando identifica-se, para cada lugar, o conjunto finito de cores que pode ser associada a ele.

Mapeando, para todos os diagramas cor X lugar, as cores que podem ser associadas a cada lugar tem-se $C(p)$. Σ é dado pelo conjunto de todas as cores que podem ser associadas a todos os lugares.

4.3.3.2. Definindo $I(p)$

A função de inicialização $I(p)$ ou marcação inicial é dada pela marcação, no modelo completo do sistema de manufatura, dos recursos (lugares), que abrigam peças no estado tecnológico inicial. A cor utilizada para a marcação destes lugares é dada pelos modelos dos processos.

Uma forma simples de obtenção do conjunto de cores, que representa a marcação inicial, reside em tomar-se a marcação inicial para cada processo, conforme a árvore de alcançabilidade do diagrama cor X lugar, resultando em um elemento

O formato da $G(t) \in [Y^{(p_x, t)} \neq Ef^{(PR1)} \text{ or } (Y^{(p_z, t)} \neq Ef^{(PR2)}) \dots]$; onde t é a transição em que está vinculada a função de condução; p_x e p_z são lugares (nos de entrada) dos arcos $In(p_x, t)$ e $In(p_z, t)$, respectivamente; $Y^{(p_x, t)}$ e $Y^{(p_z, t)}$ são variáveis vinculadas aos arcos $In(p_x, t)$ e $In(p_z, t)$, respectivamente; $Ef^{(PR1)}$ é o estado tecnológico final (cor) da peça PR1 a ser alcançado no lugar p_x ; $Ef^{(PR2)}$ é o estado tecnológico final (cor) da peça PR2 a ser alcançado no lugar p_z .

assumido pela peça em seu estado tecnológico final. função de condução deve expressar que estes arcos possuem valor diferente que o estado tecnológico final, devem ser impedidas de habilitar uma etapa. Para tanto, a nos arcos de entrada das transições que possuem valor igual à cor da peça em seu representam o estado tecnológico final de cada peça. Assim, as sentenças expressas (t, b) em cada transição com a finalidade de impedir o disparo para as cores que A função de condução (*guard function*) deve possuir uma sentença vinculada

física. finalizadas, não devendo sofrer mais nenhuma operação de transformação lógica ou As peças que estão em seu estado tecnológico final são aquelas que já estão

4.3.3.3. Definindo $G(t) $

peças entram no sistema sem terem sofrido nenhuma operação. constituído apenas com as cores definidas por $C(I(p))$. Com isto supõem-se que as O cálculo da marcação inicial é feito através da definição de um *multi-set* marcação inicial da rede, no modelo do sistema de manufatura.

definido como $C(I(p))$, o qual dá o conjunto finito de cores que pode existir na

4.3.3.4. Definindo $E(x_1, x_2)$

Os dois principais fatores que afetam a definição de $E(x_1, x_2)$ são a

característica de cada elemento de transporte e a característica formal da rede.

Sob a ótica dos elementos de transporte, foram desenvolvidas a possibilidade

de modelar equipamentos com a característica de retirar peças de um lugar e

transportá-las para vários outros, de acordo com sua capacidade. Esta é a hipótese

assumida e que deverá ser respeitada pelos elementos de transporte.

Com a finalidade de permitir esta modelagem diversas considerações devem

ser feitas sobre a definição das Redes de Petri Coloridas:

● Se para um determinado nó definido como (p, t) , pertencente a $P \times T$, In

(p, t, c) for vazia para todo c pertencente a $C(p)$, diz-se que não existe

arco ligando o lugar p à transição t .

● Um determinado nó (p, t) , pertencente a $P \times T$, In (p, t) pode ser definido

como vazio, diz-se que não existe arco conectando o lugar p a transição t .

● Se para um determinado nó definido como (t, p) , pertencente a $T \times P$, Out

(t, p, c) for vazia para todo c pertencente a $C(p)$, diz-se que não existe arco

ligando a transição t ao lugar p .

● Um determinado nó (t, p) , pertencente a $T \times P$, Out (t, p) pode ser

definido como vazio, diz-se que não existe arco conectando a transição t ao

lugar p .

Considerando-se a característica dos elementos de transporte e a definição das Redes de Petri Coloridas tem-se que as sentenças expressas nos arcos serão responsáveis por determinar o fluxo de marcas.

Com a finalidade de satisfazer a modelagem do elemento de transporte caracterizado pela hipótese assumida acima tem-se que somente haverá uma sentença expressa no arco de entrada de uma transição que possuirá um resultado não vazio, em razão do elemento de transporte retirar peças de apenas um lugar. Em seguida, com a ocorrência do transporte, ou das etapas da transição que representam o elemento de transporte, os lugares de saída que são os destinos das peças deverão ser, também, não vazios.

Para se definir as sentenças expressas nos arcos pode-se dividi-las em dois tipos: as sentenças expressas nos arcos de entrada das transições e as sentenças expressas nos arcos de saída das transições.

As sentenças expressas nos arcos de entrada das transições devem verificar se nenhum dos demais arcos de entrada desta transição são não vazios. Caso exista algum outro arco não vazio, o resultado da sentença expressa no arco em questão deverá ser vazio. Por outro lado, se todos os demais arcos não assumirem valor algum, então o arco em questão poderá assumir como valor um *multi-set* com a quantidade de elementos determinada pela quantidade máxima de elementos que pode ser manipulada por este elemento de transporte.

As sentenças expressas nos arcos de saída das transições devem realizar a mudança de cor das marcas segundo determina o modelo do processo. A diferenciação de tempo existente entre a colocação da marca em um lugar e a

colocação da marca em outro lugar através de um mesmo transportador ou seja, pelo disparo de uma transição, ocorre definindo-se *multi-sets* temporizados e a temporização de transições para cada cor. O estudo e o desenvolvimento dos *multi-sets* temporizados para modelagem de sistemas de manufatura conforme o método proposto não foi realizado neste trabalho.

Obtendo as sentenças expressas nos arcos de entrada:

A cada arco de entrada $In(p_x, t)$ de uma transição t define-se a seguinte expressão:

- $If(Y^{(p_w, t, 1)} = c_w1 \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(p_y, t, n)} = c_{yn} \text{ OR } Y^{(p_z, t, 1)} = c_{z1} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(p_z, t, m)} = c_{zm} \text{ OR } \dots)$
 $then \text{ empty } else (Y^{(p_x, t, 1)} \text{ OR } Y^{(p_x, t, 2)} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(p_x, t, q)}).$

Onde: $In(p_w, t)$ e $In(p_z, t)$ são os outros arcos de entrada conectados a t ; $Y^{(p_w, t, n)}$ e $Y^{(p_z, t, m)}$ são variáveis expressas nestes arcos, respectivamente, o valor que pode ser assumido por $Y^{(p_w, t, n)}$ é c_{wn} e c_{zm} , o valor que pode ser assumido pela variável $Y^{(p_z, t, m)}$ é c_{zm} e c_{zn} , por fim, o valor que pode ser assumido pela variável $Y^{(p_x, t, q)}$ é c_{xq} e $c_{xq} \in C(p_x)$. O operador "or" é não mutuamente exclusivo e pode ser interpretado como e/ou. A seguir são feitas algumas considerações sobre a determinação da quantidade q de variáveis $(Y^{(p_x, t, 1)}, Y^{(p_x, t, 2)}, \dots, Y^{(p_x, t, q)})$ que podem ser o resultado da sentença expressa em cada arco (p_x, t) .

A quantidade de peças que podem ser transportadas por cada um dos elementos de transporte, representados pelas transições, determina a quantidade de variáveis que possam servir como resultado da sentença expressa em cada um de seus arcos de entrada. Assim, por exemplo, se o elemento de transporte, representado pela

transição t , for capaz de transportar duas peças, seus arcos de entrada deverão possibilitar que até no máximo duas variáveis assumam, cada uma, o valor correspondente a cor de uma peça.

Como foi assumida a hipótese que o elemento de transporte retira as peças de um único lugar de origem, tem-se que se este lugar p possuir uma capacidade máxima de marcas menor que a capacidade do elemento de transporte, representado pela transição t , o arco $In(p, t)$ que conecta o lugar p a transição t deverá possuir expressão como resultado de sua sentença, no máximo, um número de variáveis igual a capacidade máxima de marcas do lugar p .

Desta forma o procedimento sistemático utilizado para a definição das sentenças consiste em, primeiramente, definir a quantidade máxima de variáveis que possam servir como resultado expresso em cada arco de entrada, definindo-as conforme a segunda parte da sentença: $else(Y^{(px, t, 1)} \text{ OR } Y^{(px, t, 2)} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(px, t, q)})$. A seguir para se definir a primeira parte da sentença combina-se as cores que podem ser assumidas a cada uma das variáveis, que são possíveis resultados dos demais arcos de entrada, assim, a primeira parte da expressão será dada por: $If(Y^{(pw, t, 1)} = c_{w1} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(pw, t, n)} = c_{wn} \text{ OR } Y^{(pz, t, 1)} = c_{z1} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(pz, t, m)} = c_{zm} \text{ OR } \dots)$ then empty. A definição completa da sentença expressa em cada arco dá-se pela união das duas partes: $If(Y^{(pw, t, 1)} = c_{w1} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(pw, t, n)} = c_{wn} \text{ OR } Y^{(pz, t, 1)} = c_{z1} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(pz, t, m)} = c_{zm} \text{ OR } \dots) \text{ then empty else } (Y^{(px, t, 1)} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(px, t, 2)} \text{ OR } \dots \text{ OR } Y^{(px, t, q)})$.

Obtendo as sentenças expressas nos arcos de saída:

No diagrama "cor X arco" define-se a cor a ser expressa no arco de entrada e a cor a ser expressa no arco de saída para a ocorrência de cada etapa. Para o exemplo

da Figura 4-4 tem-se que para a ocorrência da etapa Y_1 , o arco de entrada In (P_1, t) deverá assumir um valor c_1 e o arco de saída Out (t, P_2) deverá assumir um valor igual a c_2 .

	P1	P2	P3			
(t_1, Y_1)	c_1	0	0	(t_1, Y_1)	0	c_2
(t_1, Y_2)	0	0	0	(t_1, Y_2)	c_3	0

Figura 4-4 Exemplo de um diagrama "cor X arco".

Considerando-se o exemplo da Figura 4-4 tem-se que a sentença expressa no arco saída Out (t, P_2), para a ocorrência da etapa Y_1 , deve verificar se o resultado da sentença expressa no arco In (P_1, t) é c_1 então o resultado em Out (t, P_2) será $1^{\circ} c_2$ senão o arco Out (t, P_2) será vazio. Desta forma, a sentença expressa no arco Out (t, P_2) será dada por: $\text{If } Y_{(P_1, t)} = c_1 \text{ then } 1^{\circ} c_2 \text{ else empty}$, onde $Y_{(P_1, t)}$ é a variável resultado da sentença expressa no arco In (P_1, t) e que assumiu o valor c_1 .

Generalizando esta sentença expressa no arco de saída Out (t, p_x) obtêm-se:

- $\text{If } Y_{(p_w, t, 1)} = c_{w1} \text{ then } 1^{\circ} c_{x(w1)} \text{ else If } Y_{(p_w, t, 2)} = c_{w2} \text{ then } 1^{\circ} c_{x(w2)} \text{ else } \dots \text{ If } Y_{(p_w, t, n)} = c_{wn} \text{ then } 1^{\circ} c_{x(wn)} \text{ else If } Y_{(p_z, t, 1)} = c_{z1} \text{ then } 1^{\circ} c_{x(z1)} \text{ else } \dots \text{ If } Y_{(p_z, t, m)} = c_{zm} \text{ then } 1^{\circ} c_{x(zm)} \dots \text{ else empty.}$

Onde $Y_{(p_w, t, n)}, Y_{(p_z, t, n)}, \dots$ são variáveis resultantes das sentenças expressas nos arcos de entrada - In (p_w, t), In (p_z, t), respectivamente - da transição t , $1^{\circ} c_{x(wn)}$ e $1^{\circ} c_{x(zm)}$ são *multi-sets* resultantes das sentenças expressas no arco Out (t, p_x), sendo que $c_{x(wn)} \in C(p_x)$ e $c_{x(zm)} \in C(p_x)$.

4.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O presente Capítulo trouxe, inicialmente, a definição teórica das Redes de Petri Coloridas (CPN), lembrando que foi ampliada a definição feita por [Jensen, 96] ao ser inserido um elemento que limita a capacidade de marcas que pode existir em cada lugar.

Em seguida, é apresentado um método capaz de gerar o modelo completo do sistema de manufatura em CPN a partir do modelo de relacionamento entre os recursos e dos modelos dos processos.

Os elementos estruturais básicos são gerados diretamente a partir do modelo de relacionamento entre os recursos; já para a definição dos demais elementos foram desenvolvidos diagramas auxiliares, um relacionando cores a lugares e outro cores a arcos.

Estes diagramas foram inspirados na árvore de alcançabilidade e nas matrizes utilizadas para se fazer análise de invariantes que, conforme descrito no Capítulo 2, descrevem as relações entre lugares e transições através de matrizes e expressões algébricas.

No diagrama cor X lugar é desenvolvida uma árvore de alcançabilidade, no modelo completo do sistema de manufatura, para cada processo. Assim, tem-se o mapeamento de uma sequência de marcações obtida pela ocorrência de cada etapa para um dado processo, no modelo do sistema de manufatura.

No diagrama cor X arco, para cada processo, gera-se duas matrizes, sendo uma com as expressões para os arcos de entrada de cada etapa e a outra para os arcos

de saída de cada etapa. Mais a frente, estes diagramas serão utilizados para definir a dinâmica do sistema analiticamente.

Os diagramas cor X lugar são utilizados, principalmente para definir o diagrama cor X arco e os elementos $C(p)$, Z , $G(t) < b > e I(p)$. Já o diagrama cor X arco é utilizado principalmente para definir $E(x_1, x_2)$.

A utilização do simulador DesignCPN, mantido pelo grupo de CPN da *University of Aarhus* na Dinamarca, contribuiu para se definir e validar as expressões padrões para serem associadas aos arcos de entrada e aos arcos de saída das transições.

Durante as simulações no DesignCPN foram testadas diversas expressões associadas aos arcos com o objetivo de se atingir a abordagem proposta de modelagem até se encontrar as expressões apresentadas, que ao nosso ver foram as que melhor se enquadravam.

Tentou-se fazer a simulação do sistema de manufatura completo na plataforma DesignCPN, no entanto, acredita-se que dois fatores impediram que este objetivo fosse atingido. O primeiro fator que prejudicou foi que a ferramenta não estava admitindo a sequência de If-then-else associada a um arco e o segundo é que a ferramenta não permite que se coloque capacidade de marcas nos lugares.

O Capítulo seguinte dará um estudo de caso definindo todos os elementos estruturais e mostrando o comportamento dinâmico para o caso estudado conforme uma simulação manual obtida através da aplicação das definições 4-9 e 4-10 de habilitação e para mudança de marcação, respectivamente.

O Capítulo é estruturado da seguinte forma: inicialmente faz-se a descrição do problema, em seguida a sua modelagem através do modelo de relacionamento entre os recursos e dos modelos dos processos obedecendo às hipóteses assumidas e, por fim, gera-se o modelo do sistema de manufatura em CPN.

Este estudo de caso deverá apresentar, também, o comportamento dinâmico do sistema modelado através de uma sequência de marcações com o objetivo de mostrar que realmente apenas uma marca flui a cada disparo de transição e que este comportamento dinâmico de fato representa o fluxo de materiais pelo sistema de manufatura.

Este Capítulo apresenta um estudo de caso, mostrando como deve ser feita a modelagem pelo método proposto e a geração do modelo completo do sistema de manufatura em CPN.

5.1. INTRODUÇÃO

5. ESTUDO DE CASO

5.2. MODELO A SER ESTUDADO

5.2.1. PROBLEMA

Com o objetivo de modelar consistentemente, para o caso a ser descrito a seguir, algumas hipóteses foram assumidas:

1. O elemento de manipulação MH-r1 desloca apenas uma peça de um recurso para outro em uma rota específica;
2. O sistema exemplo é fechado, ou seja, não podem entrar novas peças no sistema além daquelas existentes;

3. Toda peça, em seu estado tecnológico inicial, estará no *buffer*. Com isto, na marcação inicial, somente o lugar BU-1 estará marcado;

4. Toda peça, em seu estado tecnológico final, estará no *buffer*. Assim, na marcação final, somente o lugar BU estará marcado;

5. Ao se modelar cada processo, ao final de cada operação realizada em um dado processador de materiais, a peça deve retornar ao *buffer* antes ser manipulada para sofrer a operação seguinte. Esta política é adotada para evitar que uma peça fique alocando um recurso sem estar realizando operação alguma;

6. Tempo tanto para processamento como para manipulação será igual a zero. Outras políticas e hipóteses poderiam ser adotadas para um sistema de manufatura; no entanto, estas acima descritas satisfazem plenamente o objetivo de

mostrar a validade do método proposto e da nova abordagem para modelagem de

sistemas de manufatura.

O objeto a ser modelado é uma estação de trabalho composta por dois elementos de processamento, um *buffer* e um elemento de manipulação de peças, sendo similar ao sistema da Figura 3-3. Cada recurso possui as seguintes características:

- MP-t1 é um torno e tem capacidade de processar uma peça por vez;
- MP-fl é uma fresa e tem capacidade de processar uma peça por vez;
- BU-1 é um *buffer* e tem capacidade para armazenar 3 peças;
- MH-r1 é um robô e manipula uma peça de cada vez.

O elemento MH é responsável pela manipulação dos materiais entre os demais recursos, ou seja, uma peça antes de se deslocar de um recurso para outro deve passar por MH. A seguir são dadas as características do processo de fabricação de cada peça:

- Peça 1 (PR1): sofre somente uma operação de torneamento em MP-t1;
- Peça 2 (PR2): sofre somente uma operação de fresamento em MP-fl;
- Peça 3 (PR3): sofre uma operação de torneamento em MP-t1 e, em seguida, uma de fresamento em MP-fl.

5.2.2. MODELO DE RELACIONAMENTO ENTRE OS RECURSOS

O modelo de relacionamento entre os recursos, conforme mostrado na Figura 5-1, é similar ao modelo da Figura 3-3 onde tem-se os dois elementos de processamento (MP-t1) e (MP-t1), 1 elemento de manipulação (MH-t1) e um *buffer* (BU-1) e as setas direcionadas indicam como os recursos se relacionam e quais seriam as possíveis rotas para o fluxo de peças.

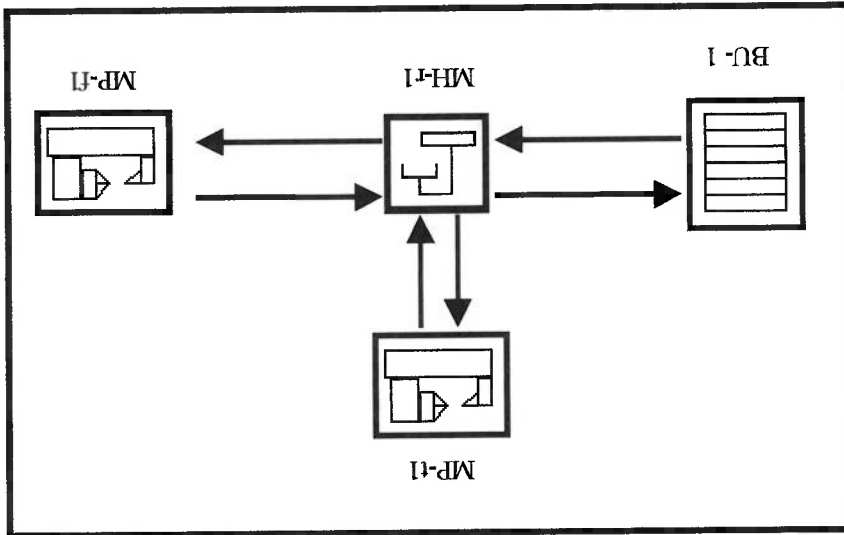


Figura 5-1 Sistema de manufatura composto por 1 BU, 1 MH e 2 MP

Para cada elemento, que deve representar um lugar, foram definidas as seguintes capacidades: $K(BU-1)=3$; $K(MP-t1)=1$ e $K(MH-t1)=1$. O Modelo de Relacionamento entre os Recursos, conforme é possível de se observar, é um modelo conceitual que mostra uma representação similar a um *lay-out* do chão de fábrica, de forma que os principais elementos representados seriam aqueles que compõem o objeto físico de um sistema de manufatura.

Pela proposta metodológica do Capítulo 3, tem-se que elemento de transporte deve ser modelado entre os elementos operacionais ou de espera, isto em razão da

necessidade de se abastecer os elementos operativos através de um de transporte. Este tipo de modelagem atende a uma quantidade expressiva de configurações do objeto físico da manufatura flexível.

Na seção seguinte são apresentados os modelos dos processos para cada peça a ser objeto de processamento na estrutura de manufatura da Figura 5-1.

5.2.3. MODELOS DOS PROCESSOS

No Capítulo 3 descreve-se que os modelos dos processos, pelo método proposto, devem trazer um plano macro do processo de cada peça individual. No plano macro define-se a rota de cada peça em uma dada estrutura de manufatura. Nos modelos dos processos, além das rotas, definem-se cores a serem assumidas pelas peças em cada lugar, assim tem-se:

- Peça 1 (PR1): sofre somente uma operação de torneamento (op.1) em MP-t1. Para que esta operação de torneamento ocorra, a peça deve percorrer a seguinte rota, pelos recursos do sistema de manufatura: BU-1 → MP-t1(op.1) → BU-1.
- Peça 2 (PR2): sofre somente uma operação de fresamento (op.2) em MP-f1. Para que esta operação de fresamento ocorra, a peça deve percorrer a seguinte rota, pelos recursos do sistema de manufatura: BU-1 → MP-f1(op.2) → BU-1.
- Peça 3 (PR3): sofre uma operação de torneamento (op.3) em MP-t1 e, em seguida, uma de fresamento (op.4) em MP-f1. Para que estas duas operações ocorram sequencialmente a peça deve percorrer a seguinte rota,

pelos recursos do sistema de manufatura: BU-1 → MP-t1(op.3) → BU-

1 → MP-t1 (op.4) → BU-1.

A Figura a seguir mostra o modelo do processo para cada uma das peças.

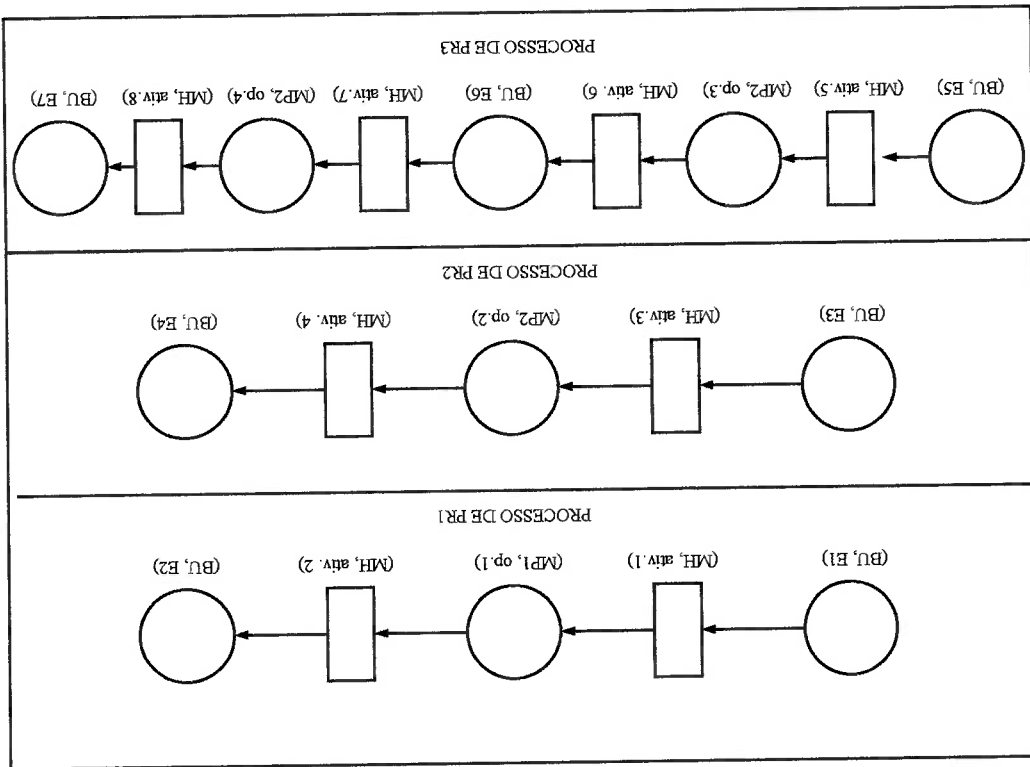


Figura 5-2 Modelos dos processos das peças PR1 e PR2 que ocorrem na estrutura de manufatura dado pelo modelo da Figura 5-1.

O modelo representado pela Figura 5-1 é conceitual refletindo a rota de cada peça no sistema de manufatura, e as operações, atividades e estados tecnológicos a serem assumidas por cada peça. É importante salientar que cada operação, estado tecnológico e atividade é identificado de forma única.

As atividades foram identificadas sequencialmente da ativ. 1 a ativ. 8 realizada por MH, as operações são identificadas sequencialmente da op. 1 a op. 4 e os estados tecnológicos são identificados sequencialmente do E1 ao E7.

5.3. GERAÇÃO DO MODELO EM CPN

5.3.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA BÁSICA DA REDE

Os elementos estruturais básicos são aqueles definidos a partir do modelo de

relacionamento entre os recursos físicos. Na Figura 5-3 tem-se o modelo do sistema

de manufatura descrito, graficamente pela forma tradicional de representação das

Redes de Petri, ou seja, os lugares representados por círculos e as transições por

retângulos.

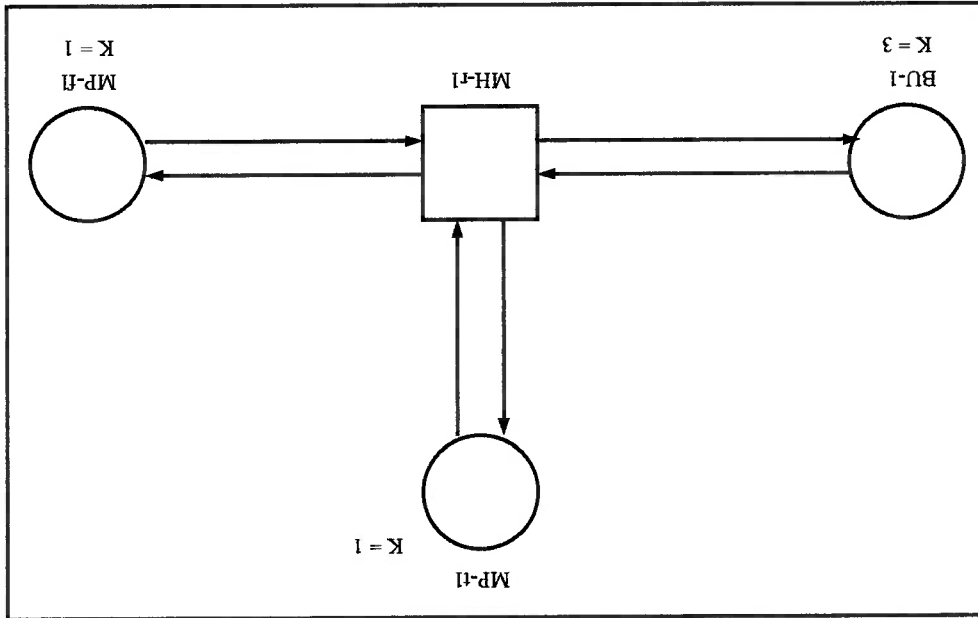
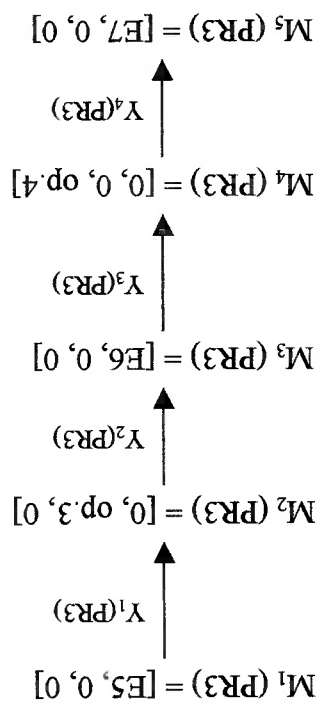


Figura 5-3 Modelo contendo os elementos estruturais básicos do sistema de manufatura.

Os elementos estruturais básicos deste modelo são:

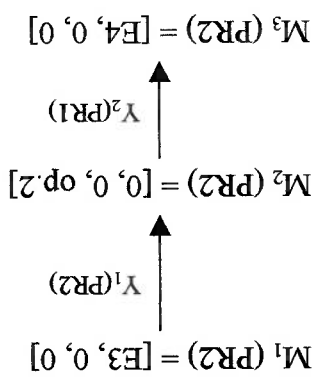
- O conjunto finito de lugares é dado por: BU, MP-11 e MP-12;
- $K(BU) = 3$; $K(MP-11) = 1$ e $K(MP-12) = 1$.
- O conjunto finito de transições é dado por: MH;

Figura 5-6 Diagrama associando cores aos lugares, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo da peça PR3.



O diagrama da Figura 5-5 mostra, para o caso do processo da peça PR2, a relação de cores a lugares feita no modelo do sistema de manufatura. Inicialmente, tem-se a marca (BU-1, E4), mudando para (MP-1, op.2) e, por fim, para (BU-1, E5).

Figura 5-5 Diagrama associando cores aos lugares referente ao processo da peça PR2.



O diagrama da Figura 5-6 mostra, para o caso do processo da peça PR3, a relação de cores a lugares feita no modelo do sistema de manufatura. Inicialmente, tem-se a marca (BU-1, E5), mudando para (MP-t1, op.3), depois para (BU-1, E6), (MP-t1, op.4) e, por fim para (BU-1, E7), finalizando o processo.

Além dos diagramas desenvolvidos para cada processo, em separado, a Figura 5-7 traz o diagrama completo de associação de cores aos lugares, feitas no modelo do sistema de manufatura, e sua utilização, direta, para o mapeamento de C(p). O diagrama da Figura 5-7 é obtido pela soma direta dos diagramas das Figuras 5-4, 5-5 e 5-6.

	BU-1	MP-t1	MP-t1
M ₁ (PR1)	E1	0	0
M ₂ (PR1)	0	op.1	0
M ₃ (PR1)	E2	0	0
M ₁ (PR2)	E3	0	0
M ₂ (PR2)	0	0	op.2
M ₃ (PR2)	E4	0	0
M ₁ (PR3)	E5	0	0
M ₂ (PR3)	0	op.3	0
M ₃ (PR3)	E6	0	0
M ₄ (PR3)	0	0	op.4
M ₅ (PR3)	E7	0	0

Figura 5-7 Diagrama completo de associação de cores aos lugares, no modelo do sistema de manufatura.

5.3.2.2. Diagrama cor X arco

O diagrama cor X arco é representado por duas matrizes, para o processo de cada peça. Um diagrama para os arcos de entrada e um para os arcos de saída.

No diagrama A^- que dá as cores assumidas pelos arcos de entrada, as colunas representam os lugares de origem do arco e as linhas as etapas (transição de destino). A cor da expressão do arco é indicada pela coordenada (lugar, etapa).

No diagrama A^+ que dá as cores assumidas pelos arcos de saída, as colunas representam os lugares de destino do arco e as linhas as etapas (transição de origem). A cor da expressão do arco é indicada pela coordenada (lugar, etapa). Para obter este diagrama são aplicadas as seguintes regras:

1. Para obter a matriz A^- aplica-se a seguinte regra: vetor etapa $Y_n =$ vetor marcação M_n dada pelo diagrama cor X lugar.

2. Para obter a matriz A^+ aplica-se a seguinte regra: vetor etapa $Y_n =$ vetor marcação M_{n+1} , sendo alcançável diretamente por M_n através da etapa Y_n .

Assim os diagramas para os processos são dados por:

	BU-1	MP-t1	MP-f1	
$Y_1(PRI)$	E1	0	0	0
$Y_2(PRI)$	0	op.1	0	0

	BU-1	MP-t1	MP-f1	
$Y_1(PRI)$	0	op.1	0	0
$Y_2(PRI)$	E2	0	0	0

Figura 5-8 Diagramas de associação de cores aos arcos, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).

O diagrama da Figura 5-8 indica que para ocorrer a etapa $Y_1(PRI)$, o arco de entrada In (BU-1, MH-r1) deve possuir expressa a cor E1 e o arco de saída Out (MH-r1, MP-t1) a cor <op.1> e, para ocorrer a etapa $Y_2(PRI)$, o arco de entrada In (MP-t1, MH-r1) a cor <op.1> e, para ocorrer a etapa $Y_2(PRI)$, o arco de saída Out (MH-r1, BU-1) a cor <E2>. Para cada etapa, os demais arcos deverão estar vazios, segundo definem as matrizes acima.

O diagrama da Figura 5-10 indica que para ocorrer a etapa Y_1 (PR3), o arco de entrada In (BU-1, MH-r1) deve possuir expressa a cor E5 e o arco de saída Out (MH-r1, MP-t1) a cor <op.3> e, para ocorrer a etapa Y_2 (PR3), o arco de entrada In (MP-t1, MH-r1) deve possuir a cor <op.3> e, o arco de saída Out (MH-r1, BU-1) a cor <E6> e, para ocorrer a etapa Y_3 (PR3), o arco de entrada In (BU-1, MH-r1) deve possuir expressa a cor E6 e o arco de saída Out (MH-r1, MP-t1) a cor <op.4> e, para ocorrer a etapa Y_4 (PR3), o arco de entrada In (MP-t1, MH-r1) deve possuir a cor

Figura 5-10 Diagramas de associação de cores aos arcos, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).

	BU-1	MP-t1	MP-f1				
Y_1 (PR3)	E5	0	0	Y_1 (PR3)	0	op.3	0
Y_2 (PR3)	0	op.3	0	Y_2 (PR3)	E6	0	0
Y_3 (PR3)	E6	0	0	Y_3 (PR3)	0	0	op.4
Y_4 (PR3)	0	0	0	Y_4 (PR3)	E7	0	0

O diagrama da Figura 5-9 indica que para ocorrer a etapa Y_1 (PR2), o arco de entrada In (BU-1, MH-r1) deve possuir expressa a cor E3 e o arco de saída Out (MH-r1, MP-t1) a cor <op.2> e, para ocorrer a etapa Y_2 (PR2), o arco de entrada In (MP-t1, MH-r1) deve possuir a cor <op.2> e, o arco de saída Out (MH-r1, BU-1) a cor <E3>. Para cada etapa os demais arcos estão vazios, segundo definem as matrizes acima.

Figura 5-9 Diagramas de associação de cores aos arcos, no modelo do sistema de manufatura, referente ao processo de uma peça (PR).

	BU-1	MP-t1	MP-f1				
Y_1 (PR2)	E3	0	0	Y_1 (PR2)	0	0	op.2
Y_2 (PR2)	0	0	0	Y_2 (PR2)	E4	0	0

<op.4> e, o arco de saída Out (MH-1, BU-1) a cor <E7>. Para cada etapa os demais

arcos estão vazios, segundo definem as matrizes acima.

Após serem montados estes diagramas, já se pode iniciar a definição dos

demais elementos estruturais para o modelo em CPN.

5.3.3. DEFININDO ELEMENTOS BASEADOS NOS MODELOS DOS PROCESSOS

5.3.3.1. Definindo $C(p)$, Σ , $G(t)$ e $I(p)$

Estes elementos estruturais do modelo completo do sistema de manufatura

em CPN são obtidos através dos diagramas cor X lugar de cada processo.

O $C(p)$ é obtido através do mapeamento das cores que podem existir em cada

lugar. Desta forma, para o exemplo, tem-se:

• C (BU-1): E1, E2, E3, E4, E5, E6 e E7; obtido pela coluna BU-1 do

diagrama da Figura 5-7.

• C (MP-t1): op.1 e op.3; obtido pela coluna MP-t1 do diagrama da Figura

5-7.

• C (MP-f1): op.2 e op.4; obtido pela coluna MP-f1 da Figura 5-7.

O elemento Σ é o conjunto finito de cores que pode existir no sistema, neste

caso $\Sigma = E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, op.1, op.2, op.3, op.4$ obtido pelo diagrama da

Figura 5-7

A função de condução $G(t)$ nas transições deve impedir que se dispare a

transição para a cor assumida no estado tecnológico final do processo de fabricação

de cada peça. A última marcação do diagrama (cor X lugar) do processo de cada

peça (Figura 5-4, 5-5 e 5-6) dá a cor (E2, E4, E7) para o estado final e todas se encontram em BU-1. A função de condução impede que estas cores sejam associadas ao arco (BU-1, MH-r1) para serem disparadas. Como viu-se no capítulo anterior, onde a variável a ser vinculada a cada arco é indicada por y com o índice dado pelo nome do arco, tem-se que $G(MH-r1): [(y^{(BU-1, MH-r1)} \neq E2) \text{ or } (y^{(BU-1, MH-r1)} \neq E4) \text{ or } (y^{(BU-1, MH-r1)} \neq E7)]$.

A marcação inicial é dada pela marcação do estado tecnológico inicial para o processo de cada peça. Assim, auxiliado pelos diagramas dados pelas Figura 5-4, 5-5 e 5-6, tem-se que a marcação inicial pode ser dada por $M_1 = [E1+E3+E5, 0, 0]$, considerando o vetor de lugares na seguinte sequência [BU-1, MP-r1, MP-r1].

5.3.3.2. Definindo $F(x_1, x_2)$

Nesta seção serão obtidas as sentenças expressas nos arcos, para o modelo do sistema de manufatura representado na Figura 5-1, para tanto será utilizado o procedimento apresentado no capítulo anterior:

Obtenção das sentenças expressas nos arcos de entrada:

Como o elemento de transporte MH-r1 possui a capacidade de manipular apenas uma peça por vez, então, cada arco de entrada poderá possuir como resultado apenas um valor igual a uma cor (correspondendo a uma peça) e este valor é assumido por uma variável. Assim, as variáveis serão $y^{(BU-1, MH-r1)}$, $y^{(MP-r1, MH-r1)}$ e $y^{(MP-r1, MH-r1)}$ expressas nos arcos In (BU-1, MH-r1), In (MP-r1, MH-r1) e In (MP-r1, MH-r1), respectivamente.

As variáveis expressas nos arcos podem assumir o valor das cores pertencentes ao conjunto finito de cores do lugar origem do arco. Desta forma tem-se

que a variável $Y_{(BU-1, MH-r1)}$, associada ao arco In (BU-1), pode assumir as cores E1, E2, E3, E4, E5, E6 e E7; a variável $Y_{(MP-r1, MH-r1)}$, associada ao arco In (MP-r1, MH-r1), pode assumir as cores op.1 e op.3 e, a variável $Y_{(MP-r1, MH-r1)}$, associada ao arco In (MP-r1, MH-r1), pode assumir as cores op.2 e op.4.

Tendo a combinação de cores associada que pode ser assumida por arco, determina-se as seguintes sentenças para o modelo em estudo:

- E (BU-1, MH-r1): If $(Y_{(MP-r1, MH-r1)} = op.1)$ or $(Y_{(MP-r1, MH-r1)} = op.3)$ or $(Y_{(MP-r1, MH-r1)} = op.2)$ or $(Y_{(MP-r1, MH-r1)} = op.4)$ then empty else $Y_{(BU-1, MH-r1)}$.
- E (MP-r1, MH-r1): If $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E1)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E2)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E3)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E4)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E5)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E6)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E7)$ or $(Y_{(MP-r1, MH-r1)} = op.2)$ or $(Y_{(MP-r1, MH-r1)} = op.4)$ then empty else $Y_{(MP-r1, MH-r1)}$.

- E (MP-r1, MH-r1): If $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E1)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E2)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E3)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E4)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E5)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E6)$ or $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E7)$ or $(Y_{(MP-r1, MH-r1)} = op.1)$ or $(Y_{(MP-r1, MH-r1)} = op.3)$ then empty else $Y_{(MP-r1, MH-r1)}$.

Obtenção das sentenças expressas nos arcos de saída:

Os diagramas “cor X arco” definem as cores que podem ser expressas nos arcos de entrada e de saída para a ocorrência de cada etapa. Para o estudo de caso em questão, as sentenças expressas nos arcos de saída são dadas por:

- E (MH-r1, MP-r1): If $Y_{(BU-1, MH-r1)} = E1$ then 1'op.1 else $(Y_{(BU-1, MH-r1)} = E5$ then 1'op.3 else empty);

5.4. COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA DE MANUFATURA

Nas seções anteriores definiu-se o modelo em Redes de Petri Coloridas para o

sistema de manufatura objeto de estudo. Assim, faz-se a simulação deste modelo em

Rede com a finalidade de verificar se esta representação é consistente.

Conforme descrito no Capítulo 2, a simulação é uma técnica utilizada para

mostrar a presença de propriedades indesejáveis. Para o caso estudado obtêm-se o

comportamento deste modelo checando se os elementos operativos não recebem uma

quantidade de peças maior que sua capacidade, se o elemento de transporte não é

responsável pelo deslocamento de uma quantidade de peças maior que sua


capacidade e se, havendo diversas peças com processos distintos sendo


sequencialmente executadas, ocorre alguma situação de bloqueio ou de

comportamento indesejável.

A Figura 5-11 representa o modelo completo do sistema de manufatura com

todos seus elementos estruturais definidos para a marcação inicial. Com a finalidade

de padronização a cor verde representa a peça PR1 < , a azul a peça PR2

> e a vermelha a peça PR3 < , >.

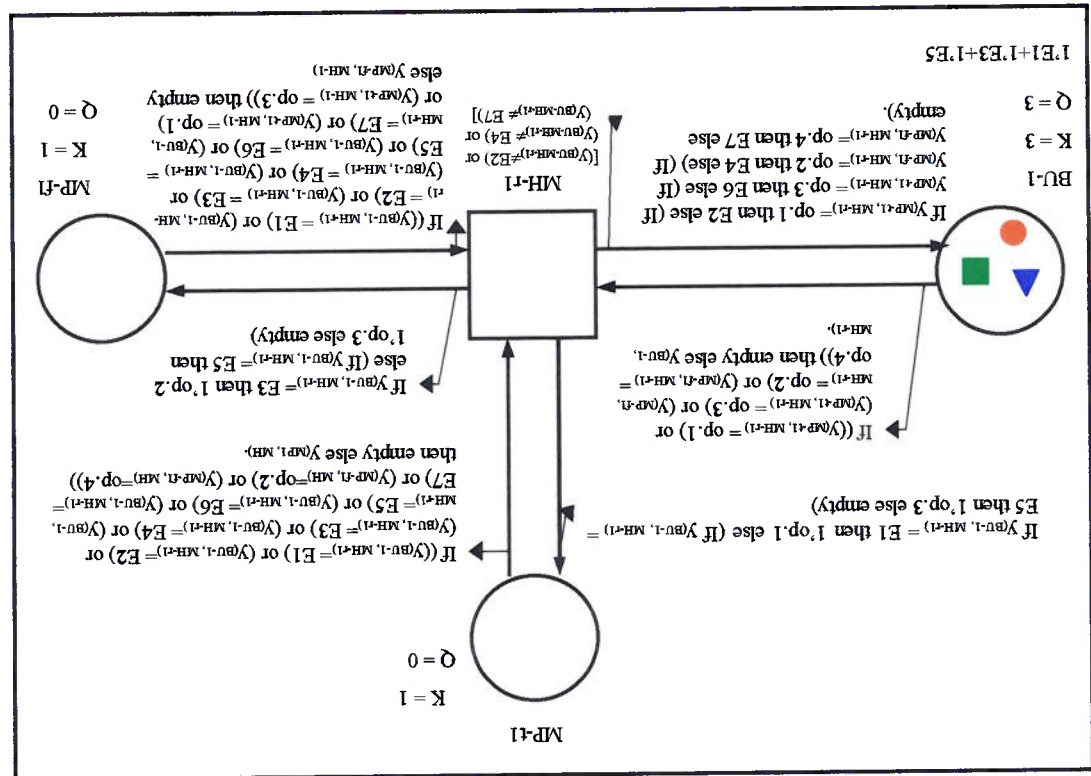


Figura 5-11 M_1 para o modelo contendo os elementos estruturais básicos do sistema de manufatura.

Considerando-se as equações vinculadas aos arcos tem-se que a transição MH-r1 está habilitada, alternativamente, para os seguintes valores a serem assumidos pela variável $Y_{(BU-1, MH-r1)}$ do arco (BU-1, MH-r1): E1 ou E3 ou E5. Arbitrando que o valor assumido por $Y_{(BU-1, MH-r1)}$ seja igual a E1, tem-se que, para este valor, o arco de saída (MH-r1, MP-t1) adiciona 1 op.1 no lugar (MP-t1) e os demais arcos de saída serão vazios.

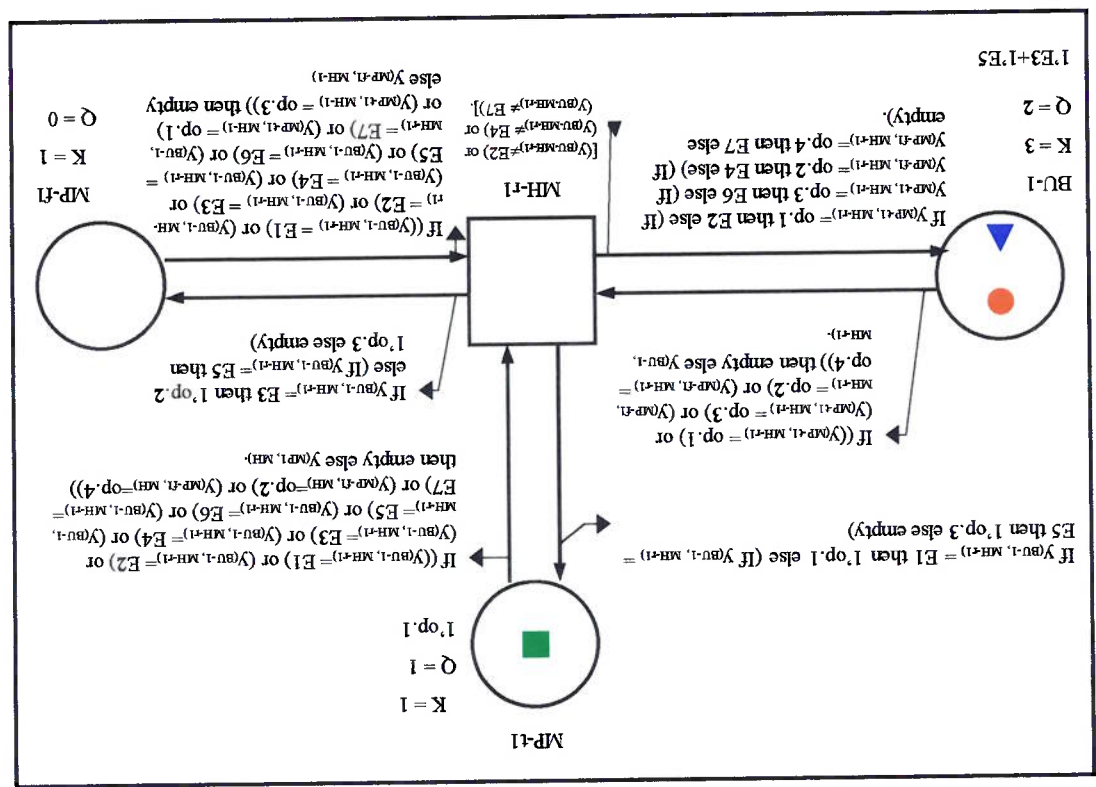
Considerando-se a marca que flui como sendo a peça PR1 < ■ > tem-se: a peça PR-1 no seu estado tecnológico inicial E-1 em BU é manipulada de BU-1 para MP-t1 pelo manipulador MH-r1 e, em MP-t1 irá sofrer a op.1. A Figura 5-12 a seguir mostra próxima marcação.

tem-se que será retirado E3 de BU e adicionado 1 op.2 em MP-fl.

Considerando-se a marca que flui como sendo a peça PR2 <▲>tem-se: a peça PR-2 no seu estado tecnológico inicial E-3 em BU é manipulada de BU-1 para MP-t1 pelo manipulador MH-r1 e, em MP-fl irá sofrer a op.2. A Figura 5-13 a seguir mostra a próxima marcação.

Para a marcação da Figura 5-12 a transição MH-r1 está habilitada, alternativamente para $Y_{(BU-1, MH-r1)} = E3$ ou para $Y_{(MP-t1, MH-r1)} = op.1$. Desta forma, arbitrou-se pelo disparo quando $Y_{(BU-1, MH-r1)} = E3$. Com a ocorrência deste disparo

Figura 5-12 M2 para o disparo de $Y_{(BU-1, MH-r1)} = E1$.



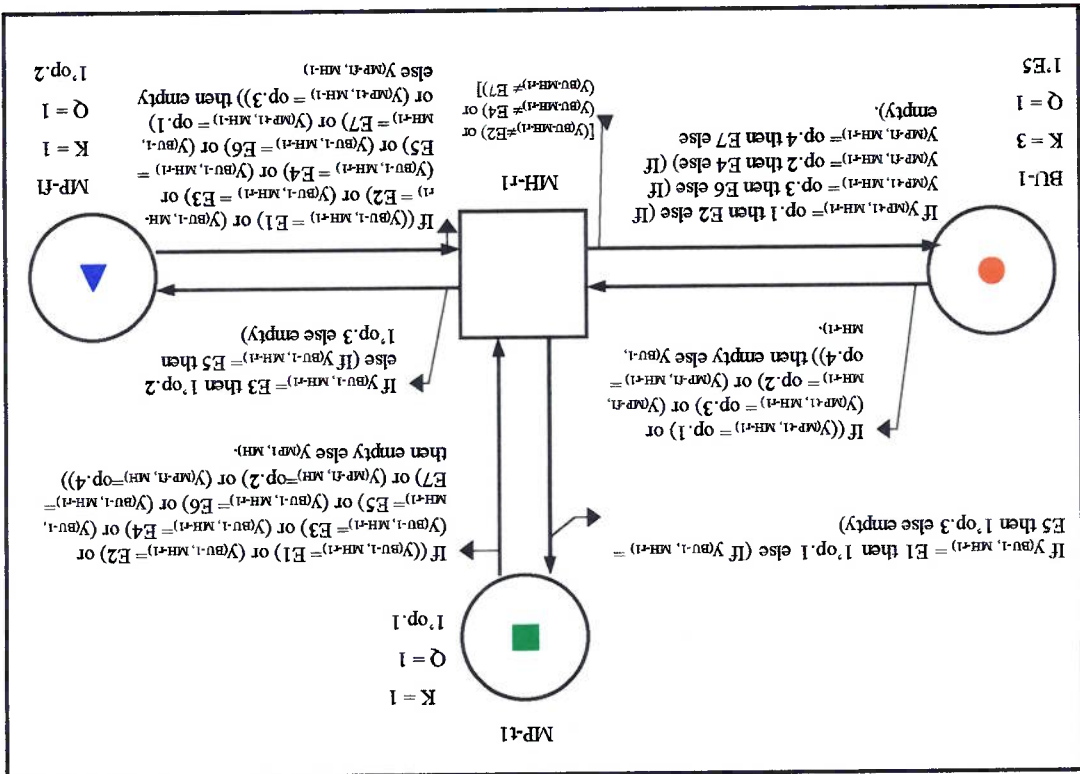


Figura 5-13 M3 para o disparo quando $Y_{BU-1, MH-1} = E3$.

Para a marcação da Figura 5-13 a transição MH-1 está habilitada, alternativamente para $Y_{MP-1, MH-1} = \text{op. } 1$ ou para $Y_{MP-1, MH-1} = \text{op. } 2$. Desta forma, arbitrou-se pelo disparo para $Y_{MP-1, MH-1} = \text{op. } 1$. Com a ocorrência deste disparo tem-se que será retirado op.1 de MP-1 e adicionado 1 E2 em BU-1.

Considerando-se a marca que flui como sendo a peça $PR1 < \blacksquare >$ tem-se: a peça PR-1 após realizada a op.1 em MP-1 é manipulada de MP-1 para BU-1 pelo manipulador MH-1 e, em BU estará em seu estado tecnológico final E2. Esta próxima marcação é dada pelo modelo da Figura 5-14.

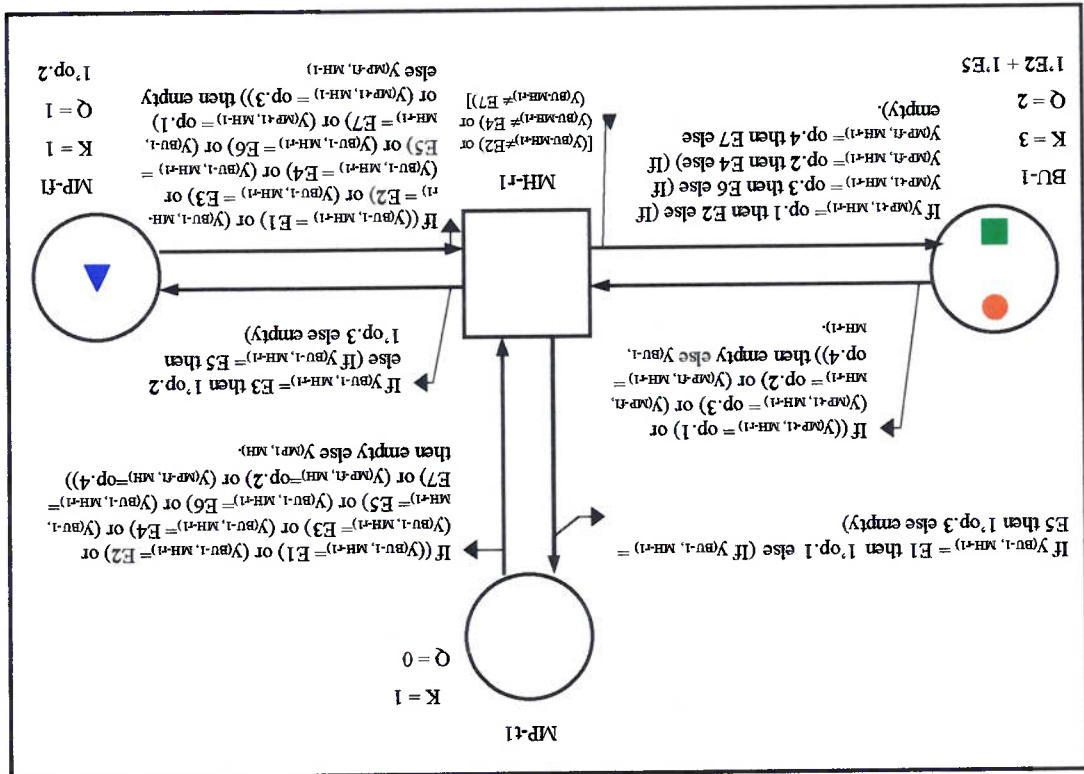


Figura 5-14 M4 para o disparo quando $Y_{MP-t1, MH-t1} = op. 1$.

Para a marcação da Figura 5-14 a transição $MH-r1$ está habilitada, alternativamente para $Y_{MP-t1, MH-t1} = op. 2$ ou para $Y_{BU-1, MH-t1} = E5$. Desta forma, arbitrou-se pelo disparo para $Y_{BU-1, MH-t1} = E5$. Com a ocorrência deste disparo tem-se que será retirado 1 E5 de $BU-1$ e adicionado 1 op. 3 em $MP-t1$.

Considerando-se a marca que flui como sendo a peça $PR3 >$ (red circle) > tem-se: a peça $PR-3$, no seu estado tecnológico inicial $E-3$ em BU , é manipulada de $BU-1$ para $MP-t1$ pelo manipulador $MH-r1$ e, em $MP-t1$ irá sofrer a op. 3. Esta próxima marcação é dada pelo modelo da Figura 5-15.

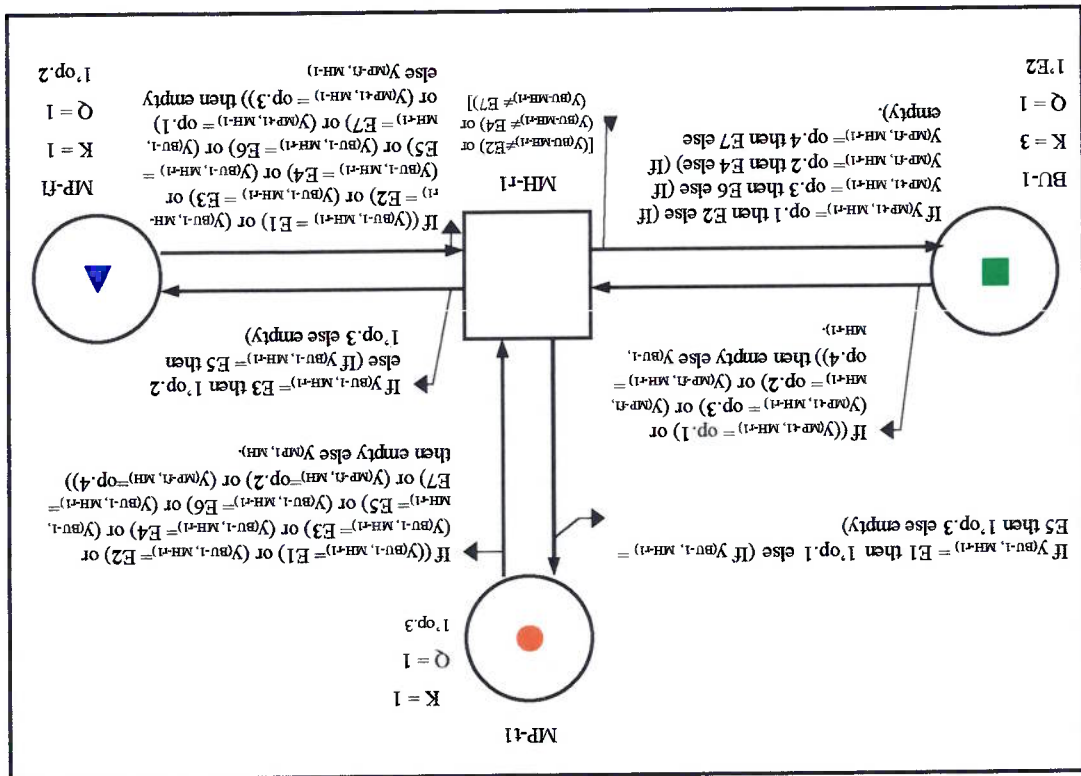


Figura 5-15 Ms para o disparo quando $Y_{(BU-1, MH-r1)} = E5$.

Para a marcação da Figura 5-15 a transição MH-r1 está habilitada, alternativamente para $Y_{(MP-f1, MH-r1)} = op.3$ ou para $Y_{(MP-f1, MH-r1)} = op.2$. Desta forma, arbitrou-se pelo disparo para $Y_{(MP-f1, MH-r1)} = op.2$. Com a ocorrência deste disparo tem-se que será retirado op.2 de MP-f1 e adicionado 1'E4 em BU-1.

Considerando-se a marca que flui como sendo a peça PR2 < > tem-se: a peça PR-2 após realizada a op.2 em MP-f1 é manipulada de MP-f1 para BU-1 pelo manipulador MH-r1 e, em BU-1 estará em seu estado tecnológico final E4. Esta próxima marcação é dada pelo modelo da Figura 5-16.

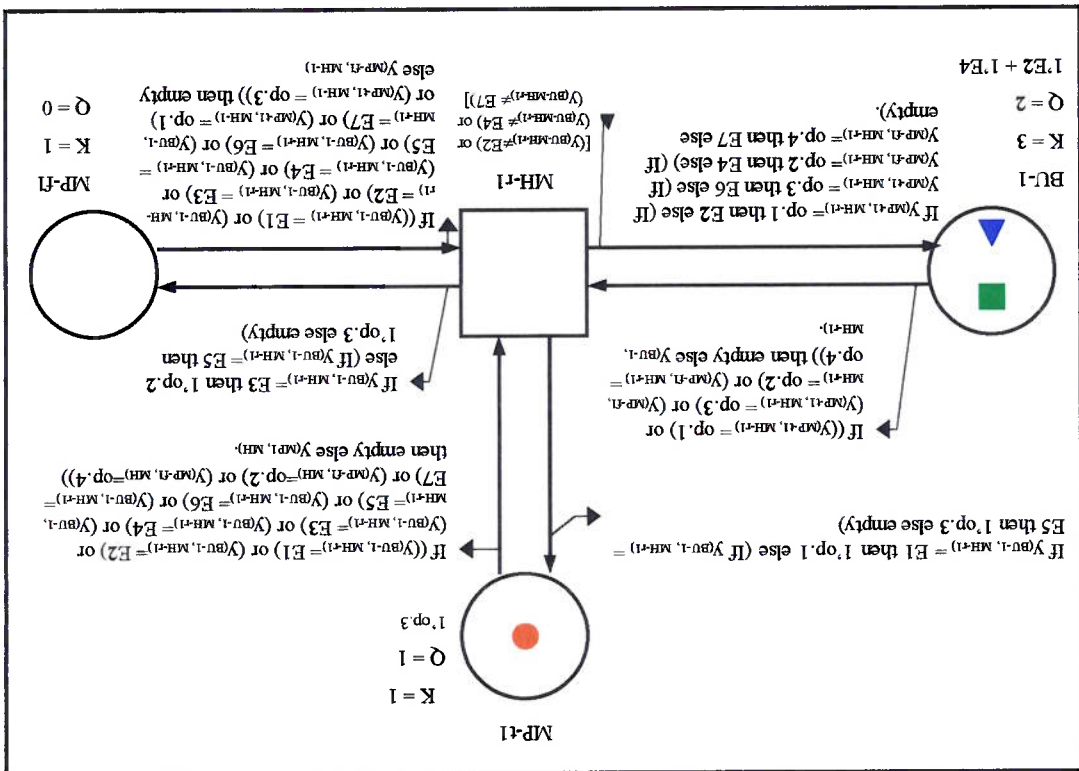


Figura 5-16 M_6 para o disparo quando $Y_{(MP-1, MH-1)} = \text{op. } 2$.

Para a marcação da Figura 5-16 a transição MH-1 está habilitada quando

$Y_{(MP+1, MH-1)} = \text{op. } 3$. Desta forma, tem-se o disparo para $Y_{(MP+1, MH-1)} = \text{op. } 3$. Com a

ocorrência deste disparo tem-se que será retirado op.3 de MP-1 e adicionado 1'E6

em BU-1.

Considerando-se a marca que flui como sendo a peça PR3 < ● > tem-se: a

peça PR-3 após realizada a op.3 em MP-1 é manipulada de MP-1 para BU-1 pelo

manipulador MH-1 e, em BU estará em seu estado tecnológico E6. Esta próxima

marcação é dada pelo modelo da Figura 5-17.

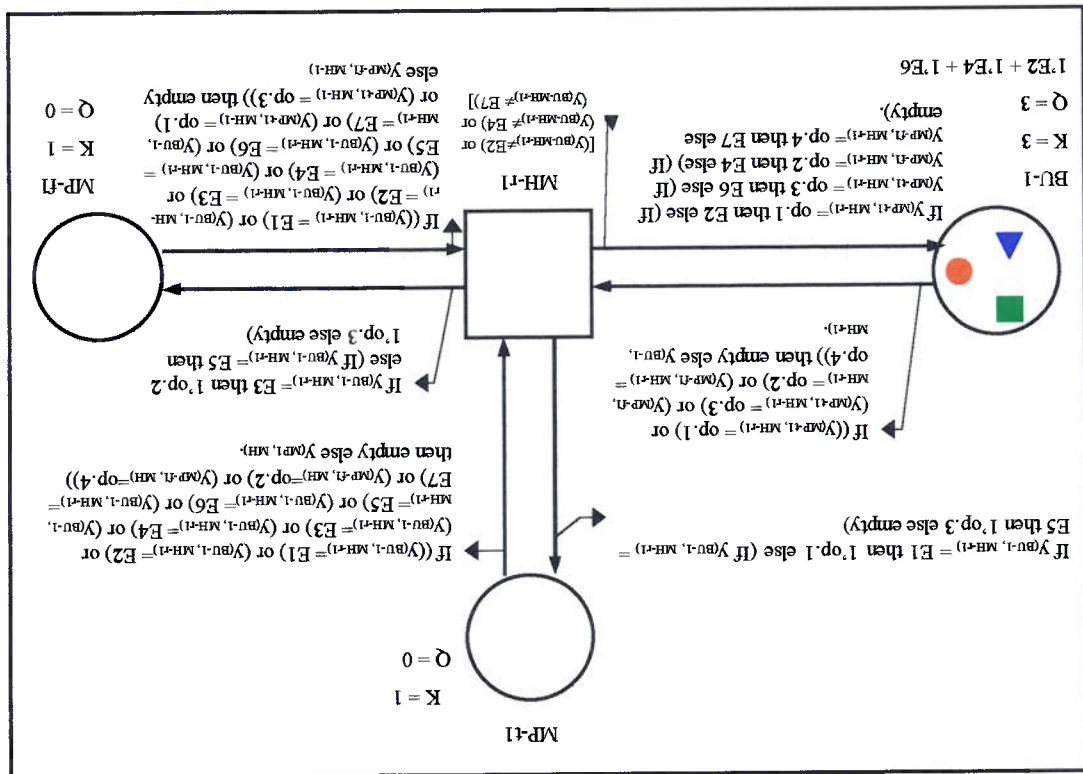


Figura 5-17 *M_r* para o disparo quando $Y_{MP-F1, MH-r1} = \text{op. } 3$.

Para a marcação da Figura 5-17 a transição MH-r1 está habilitada, somente

quando $Y_{BU-1, MH-r1} = E6$. Desta forma, o disparo quando $Y_{BU-1, MH-r1} = E6$ será

retirado 1 E6 de BU-1 e adicionado 1 op. 4 em MP-F1.

Considerando-se a marca que flui como sendo a peça PR3 < tem-se: a

peça PR-3, no seu estado tecnológico E-6 em BU, é manipulada de BU-1 para MP-F1 pelo manipulador MH-r1 e, em MP-F1 irá sofrer a op.4. Esta próxima marcação é

dada pelo modelo da Figura 5-14.

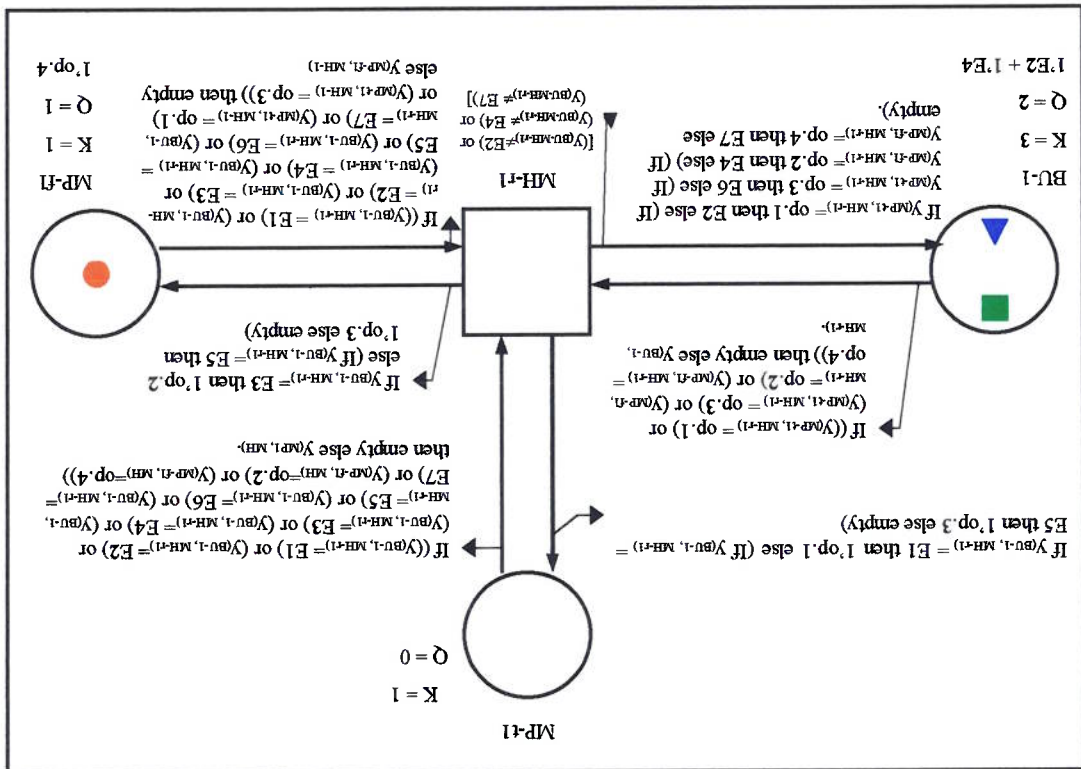


Figura 5-18 Na para o disparo quando $Y_{(BU-1, MH-1)} = E6$.

Para a marcação da Figura 5-18 a transição $MH-1$ está habilitada, quando

$Y_{(MP-F1, MH-1)} = \text{op. } 4$. Desta forma, com o disparo $Y_{(MP-F1, MH-1)} = \text{op. } 4$ tem-se que será

retirado $\text{op. } 4$ de $MP-F1$ e adicionado 1 $E7$ em $BU-1$.

Considerando-se a marca que flui como sendo a peça $PR3 < \bullet \text{ tem-se: a}$

peça $PR-3$ após realizada a $\text{op. } 4$ em $MP-F1$ é manipulada de $MP-F1$ para $BU-1$ pelo manipulador $MH-1$ e, em $BU-1$ estará em seu estado tecnológico final $E7$. Esta próxima marcação é a última a ser alcançada pelo sistema, pois, todas as peças já estarão prontas e no seu estado tecnológico final. A transição $MH-1$ é impedida de realizar outros disparos devido a função de condução vinculada a ela. Esta marcação

final é dada pelo modelo da Figura 5-19.

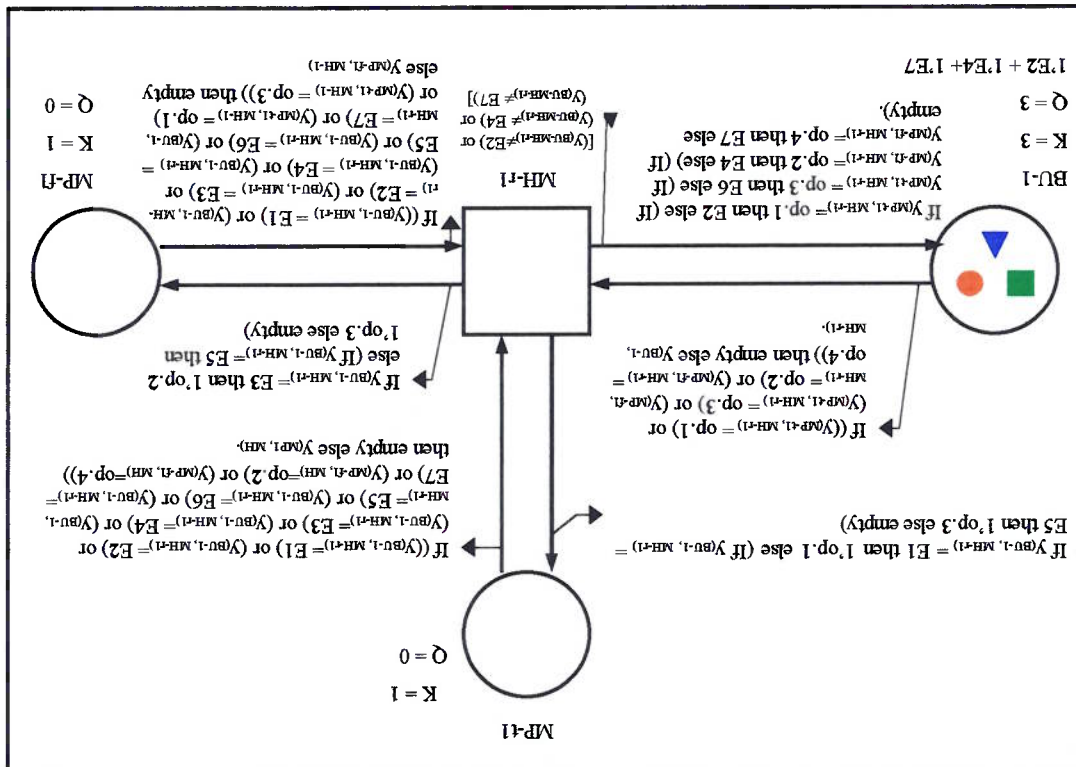
No Capítulo presente procurou-se mostrar um estudo de caso para modelagem segundo o método proposto no Capítulo 3, desenvolvendo dois modelos de relacionamento entre os recursos e os modelos dos processos. Destes dois modelos gera-se, segundo a sistemática estabelecida no Capítulo 4, o modelo completo do sistema de manufatura em CPN.

No modelo gerado em CPN é possível de acompanhar a dinâmica de cada peça pela estrutura física do sistema de manufatura, obtendo o fluxo de materiais do sistema de manufatura.

O caso estudado é uma estação de trabalho composta por um *buffer* um elemento manipulador e 2 elementos de processamento, na qual são executadas as

5.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Figura 5-19 M_6 - *marcação final, atingida com o disparo quando $Y_{MP-f1, MH-r1} = op.4$.*



operações responsáveis pela transformação das peças PR1, PR2 e PR3 nos seus estados tecnológicos finais. A complexidade deste modelo está relacionada com o fato das peças consecutivamente executadas possuírem operações distintas.

A proposta de se modelar inicialmente o modelo dos recursos e, em seguida, os modelos dos processos, definindo a rota de cada peça na estrutura de manufatura é bastante simples e, ao nosso ver, facilmente executadas mesmo por aqueles que não são especialistas em modelagem ou em Redes de Petri.

O desenvolvimento direto de um modelo em CPN, segundo o paradigma de modelar o objeto físico por recursos e as marcas por peças, torna-se uma tarefa muito complicada, haja visto a complexidade das equações vinculadas aos arcos e transições.

A sistematização da geração do modelo em CPN através do modelo de relacionamento entre os recursos contribui de maneira significativa para se desenvolver um software que gere automaticamente o modelo em CPN.

O modelo em CPN, gerado através de uma sistemática definida a partir dos modelos dos recursos e dos modelos dos processos, pode servir de base para simulações, visando a análise de desempenho, ao ser acrescentada a variável de tempo ao sistema.

6. MODELO ANALÍTICO DO SISTEMA DE MANUFATURA

6.1. INTRODUÇÃO

É proposto um método para geração das expressões algébricas que formalizam o modelo completo do sistema de manufatura a partir do modelo de relacionamento entre recursos e do modelos dos processos. Para tanto, são utilizados os diagramas auxiliares “cor X lugar” e “cor X arco”. Este método é fundamental para validar analiticamente os modelos do sistema de manufatura e para o desenvolvimento de ferramentas e sistemas para análise.

Assim, apresenta-se o algoritmo responsável pela obtenção do comportamento dinâmico do sistema, em seguida, a definição das matrizes utilizadas e, por fim, um estudo de caso, similar ao do Capítulo 5.

6.2. MÉTODO DE GERAÇÃO E EVOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

6.2.1. ALGORITMO

Algoritmo utilizado para obter a evolução do sistema:

1. Calcular o vetor capacidade K ;
2. Calcular as matrizes A^- de arcos de entrada para cada etapa e A^+ para arcos de saída de cada etapa;
3. Marcação atual = marcação inicial;
4. Calcular o vetor Q para marcação atual;
5. Obter o vetor das etapas habilitadas, definidas pelas seguintes condições, conforme definição 4 – 9:
 - $\forall p \in P: \sum E(p, t) < b > \leq M(p)$, onde $(t, b) \in Y$;
 - $\forall p \in P: Q(M(p) - \sum E(p, t) < b > + \sum E(t, p) < b >) \leq K(p)$, onde $(t, b) \in Y$;
6. Resolver os conflitos para se obter o vetor das transições habilitadas;
7. Obter a próxima marcação;
8. Marcação atual = próxima marcação;
9. Se a condição de parada ainda não foi atingida, então voltar ao 4.

A condição de parada pode ser dada por um certo número de interações ou pela situação onde todas as peças estejam em seu estado tecnológico final e , assim, não existir mais transições habilitadas.

Um conflito de etapas habilitadas pode ser resolvido de diversas formas, tais como prioridade de disparo, ordem definida, sistemas especialistas, etc.

6.2.2. CÁLCULO DE $K(P)$, A^- , A^+

Os elementos estruturais básicos da rede são definidos de maneira análoga à

do Capítulo 4:

O vetor K relaciona a cada lugar sua capacidade máxima de marcas.

A definição da matriz A^- e A^+ é feita quando obtêm-se os diagramas "cor X

arco" para cada processo.

6.2.3. VETOR M_1 E CÁLCULO DE $Q(P)$

O vetor M_1 fornece a marcação inicial do sistema, sendo o resultado o multi-

set existente em cada um dos lugares.

O vetor $Q(p)$ fornece para cada lugar a soma dos coeficientes do multi-set,

resultando no número de marcas existente em cada lugar, para a marcação em

questão.

6.2.4. OBTENDO ETAPAS HABILITADAS

Para cada etapa faz-se os seguintes cálculos:

- Vetor A^- da etapa \leq vetor marcação;
- Vetor Q para (vetor marcação - vetor A^- + vetor A^+) \leq vetor $K(p)$,

	BU-1	MP-t1	MP-f1
$Y_1(PR1)$	E1	0	0
$Y_2(PR1)$	0	op.1	0
$Y_1(PR2)$	E3	0	0
$Y_2(PR2)$	0		op.2
$Y_1(PR3)$	E5	0	0
$Y_2(PR3)$	0	op.3	0
$Y_3(PR3)$	E6	0	0
$Y_4(PR3)$	0	0	op.4

Cálculo da matriz A:

- $K(p) = [3, 1, 1]$

Definição do vetor K(p):

Assim, inicia-se o procedimento para execução do algoritmo: diretamente para a evolução dinâmica do sistema através deste método algébrico. O estudo de caso é o mesmo do Capítulo 5, e por esse motivo, parte-se

6.3. ESTUDO DE CASO

$A^+) + (\text{vetor } A^+)$

O cálculo da marcação seguinte é dada por: (vetor marcação atual) – (vetor

quando não houver mais etapas habilitadas.

arbitrariamente, segundo o exemplo do Capítulo 5; o momento de parada ocorre as etapas a serem disparadas, as quais, para a resolução do exemplo, serão definidas,

Acima citou-se uma série de maneiras de se resolver os conflitos e se definir

Estas duas condições determinam as etapas habilitadas.

Calculo da matriz A⁺:

	BU-1	MP-t1	MP-fl
Y ₁ (PR1)	0	op.1	0
Y ₂ (PR1)	E2	0	0
Y ₁ (PR2)	0	0	op.2
Y ₂ (PR2)	E4	0	0
Y ₁ (PR3)	0	op.3	0
Y ₂ (PR3)	E6	0	0
Y ₃ (PR3)	0	0	op.4
Y ₄ (PR3)	E7	0	0

Vetor marcação M₁ = [E1+ E3+E5, 0, 0]:

Calculo do vetor Q (M₁) = [3, 0, 0];

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M₀:

Pela condição 1 (Vetor A_i da etapa ≤ vetor marcação) tem-se as seguinte

etapas:

- Y₁(PR1) = [E1, 0, 0] ≤ [E1+E3+E5, 0, 0]
- Y₁(PR2) = [E3, 0, 0] ≤ [E1+E3+E5, 0, 0]
- Y₁(PR3) = [E3, 0, 0] ≤ [E1+E3+E5, 0, 0]

Executando a condição 2 para estas etapas tem-se:

- Etapa Y₁(PR1): Q ([E1+ E3+E5, 0, 0] - [E1, 0, 0] + [0, op.1, 0]) ≤ [3, 1, 1] ⇒ Q ([E3+E5, op.1, 0]) ≤ [3, 1, 1] ⇒ [2, 1, 0] ≤ [3, 1, 1] ∴ ok.

- Etapa Y_1 (PR2): $Q([E_1+E_5, 0, op.2]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [2, 0, 1] \leq [3, 1, 1] \therefore ok$
- Etapa Y_1 (PR3): $Q([E_1+E_3+E_5, 0, 0] - [E_5, 0, 0] + [0, op.3, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q([E_1+E_3, op.3, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [2, 1, 1] \leq [3, 1, 1] \therefore ok$

As três etapas atendem as duas condições de habilitação e, como no exemplo do Capítulo 5, a etapa Y_1 (PR1) é disparada, assim a nova marcação M_2 será dada por:

- Vetor marcação $M_2 = (\text{vetor marcação } M_1) - (\text{vetor } A^- \text{ para etapa } Y_1 + (\text{PR1})) + (\text{vetor } A^+ \text{ para etapa } Y_1 (\text{PR1})) \Rightarrow M_2 = [E_1+E_3+E_5, 0, 0] - [E_1, 0, 0] + [0, op.1, 0] \Rightarrow M_2 = [E_3+E_5, op.1, 0]$

Para a marcação $M_2 = [E_3+E_5, op.1, 0]$,

Cálculo do vetor $Q(M_2) = [2, 1, 0]$;

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M_1 :

Pela condição 1 (Vetor A^- da etapa \leq vetor marcação) tem-se as seguintes etapas:

- Y_1 (PR2) = $[E_3, 0, 0] \leq [E_3+E_5, op.1, 0]$;
- Y_1 (PR3) = $[E_5, 0, 0] \leq [E_3+E_5, op.1, 0]$;
- Y_2 (PR1) = $[0, op.1, 0] \leq [E_3+E_5, op.1, 0]$.

Executando a condição 2 para estas etapas tem-se:

- Etapa Y_1 (PR2): $Q([E_3 + E_5, op.1, 0] - [E_3, 0, 0] + [0, 0, op.2]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q([E_5, op.1, op.2]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [1, 1, 1] \leq [3, 1, 1] \therefore ok.$
- Etapa Y_1 (PR3): $Q([E_3 + E_5, op.1, 0] - [E_5, 0, 0] + [0, op.3, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q([E_3, op.1 + op.3, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [1, 2, 0] \leq [3, 1, 1] \therefore NÃO$

SATISFAZ.

- Etapa Y_2 (PR1): $Q([E_3 + E_5, op.1, 0] - [0, op.1, 0] + [E_2, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q([E_2 + E_3 + E_5, op.1, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [3, 0, 0] \leq [3, 1, 1] \therefore ok.$

As etapas Y_1 (PR2) e Y_2 (PR1) atendem as duas condições de habilitação e,

como no exemplo do Capítulo 5, a etapa Y_1 (PR2) é disparada, assim a nova

marcação M_3 será dada por:

- Vetor marcação $M_3 =$ (vetor marcação M_2) - (vetor A^- para etapa Y_1 (PR2)) + (vetor A^+ para etapa Y_1 (PR2)) $\Rightarrow M_3 = [E_3 + E_5, op.1, 0] - [E_1, 0, 0] + [0, 0, op.2] \Rightarrow M_3 = [E_5, op.1, op.2].$

Para a marcação $M_3 = [E_5, op.1, op.2].$

Cálculo do vetor $Q(M_3) = [1, 1, 1].$

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M_3 :

Pela condição 1 (Vetor A^- da etapa \leq vetor marcação) tem-se as seguintes

etapas:

- Y_1 (PR3) = $[E_5, 0, 0] \leq [E_5, op.1, op.2]$

- $Y_2 (PR1) = [0, op.1, 0] \leq [E5, op.1, op.2]$
- $Y_2 (PR2) = [0, 0, op.2] \leq [E5, op.1, op.2]$

Executando a condigão 2 para estas etapas tem-se:

- Etapa $Y_1 (PR3)$: $Q ([E5, op.1, op.2] - [E5, 0, 0] + [0, 0, op.3]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q ([0, op.1 + op.3, op.2]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [0, 2, 1] \leq [3, 1, 1] \therefore \text{NÃO}$

SATISFAZ.

- Etapa $Y_2 (PR1)$: $Q ([E5, op.1, op.2] - [0, op.1, 0] + [E2, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q ([E2 + E5, 0, op.2]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [2, 0, 1] \leq [3, 1, 1] \therefore \text{ok.}$

- Etapa $Y_2 (PR2)$: $Q ([E5, op.1, op.2] - [0, 0, op.2] + [E4, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q ([E4 + E5, op.1, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [2, 1, 0] \leq [3, 1, 1] \therefore \text{ok.}$

As duas etapas, $Y_2 (PR1)$ e $Y_2 (PR2)$, atendem as duas condições de habilitação e, como no exemplo do Capítulo 5, a etapa $Y_2 (PR1)$ é disparada, assim a nova marcação M_4 será dada por:

Vetor marcação $M_4 = (\text{vetor marcação } M_3) - (\text{vetor } A_+ \text{ para etapa } Y_2 (PR1)) + (\text{vetor } A_+ \text{ para etapa } Y_2 (PR2)) \Rightarrow M_4 = [E5, op.1, op.2] - [0, op.1, 0] + [E2, 0, 0] \Rightarrow M_4 = [E2 + E5, 0, op.2].$

Para a marcação $M_4 = [E2 + E5, 0, op.2].$

Cálculo do vetor $Q (M_4) = [2, 0, 1].$

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M_4 :

Pela condição 1 (Vetor A⁻ da etapa ≤ vetor marcação) tem-se as seguintes

etapas:

- $Y_1 (PR3) = [E5, 0, 0] \leq [E2 + E5, 0, op.2]$;
- $Y_2 (PR2) = [0, 0, op.2] \leq [E2 + E5, 0, op.2]$

Executando a condição 2 para estas etapas tem-se:

- Etapa $Y_2 (PR2)$: $Q ([E2 + E5, 0, op.2] - [0, 0, op.2] + [E4, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q ([E2 + E5, 0, 0]) \leq [3, 0, 0] \leq [3, 1, 1] \therefore ok$.
- Etapa $Y_1 (PR3)$: $Q ([E2 + E5, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [1, 1, 1] \leq [3, 1, 1] \therefore ok$.

- Etapa $Y_1 (PR3)$: $Q ([E2 + E5, 0, op.2] - [E5, 0, 0] + [0, op.3, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q ([E2, op.3, op.2]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [1, 1, 1] \leq [3, 1, 1] \therefore ok$

As duas etapas atendem as duas condições de habilitação e, como no exemplo do Capítulo 5, a etapa $Y_1 (PR3)$ é disparada, assim a nova marcação M_5 será dada

por:

$$\text{Vetor marcação } M_5 = (\text{vetor marcação } M_4) - (\text{vetor } A^- \text{ para etapa } Y_1 (PR3)) + (\text{vetor } A^+ \text{ para etapa } Y_1 (PR3)) \Rightarrow M_5 = [E2 + E5, 0, op.2] - [E5, 0, 0] + [0, op.3, 0] \Rightarrow M_5 = [E2, op.3, op.2].$$

Para a marcação $M_5 = [E2, op.3, op.2]$.

$$\text{Cálculo do vetor } Q (M_5) = [1, 1, 1]$$

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M_5 :

Pela condição 1 (Vetor A da etapa ≤ vetor marcação) tem-se as seguintes

etapas:

- $Y_2(\text{PR2}) = [0, 0, \text{op.2}]$;
- $Y_2(\text{PR3}) = [0, \text{op.3}, 0]$

Executando a condição 2 para estas etapas tem-se:

- Etapa $Y_2(\text{PR2})$: $Q([E2, \text{op.3}, \text{op.2}] - [0, 0, \text{op.2}] + [E4, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q([E2+E4, \text{op.3}, 0]) \leq [3, 1, 1] \therefore \text{ok.}$

- Etapa $Y_2(\text{PR3})$: $Q([E2, \text{op.3}, \text{op.2}] - [0, \text{op.3}, 0] + [E6, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q([E4+E6, 0, \text{op.2}]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [2, 1, 0] \leq [3, 1, 1] \therefore \text{ok.}$

As duas etapas atendem as duas condições de habilitação e, como no exemplo do Capítulo 5, a etapa $Y_2(\text{PR2})$ é disparada, assim a nova marcação M_6 será dada

por:

$$\begin{aligned} \text{Vetor marcação } M_6 &= (\text{vetor marcação } M_4) - (\text{vetor A para etapa } Y_2(\text{PR2})) \\ &+ (\text{vetor A para etapa } Y_2(\text{PR2})) \Rightarrow M_6 = [E2, \text{op.3}, \text{op.2}] - [0, 0, \text{op.2}] + [E4, 0, 0] \\ \Rightarrow M_6 &= [E2+E4, \text{op.3}, 0]. \end{aligned}$$

$$\underline{\text{Para a marcação } M_6 = [E2+E4, \text{op.3}, 0].}$$

$$\text{Cálculo do vetor } Q(M_6) = [2, 1, 0];$$

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M_6 :

Pela condição 1 (Vetor A' da etapa ≤ vetor marcação) tem-se as seguintes

etapas:

- $Y_2 (PR3) = [0, op.3, 0] \leq [E2+E4, op.3, 0]$.

Executando a condição 2 para esta etapa tem-se:

- Etapa $Y_2 (PR3): Q ([E2+E4, op.3, 0] - [0, op.3, 0] + [E6, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q ([E2+E4+E6, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] : ok.$

A etapa atende as duas condições de habilitação e, como no exemplo do

Capítulo 5, a etapa $Y_2 (PR3)$ é disparada, assim a nova marcação, M_7 , será dada por:

$$\text{Vetor marcação } M_7 = (\text{vetor marcação } M_6) - (\text{vetor } A' \text{ para etapa } Y_2 (PR3))$$

$$+ (\text{vetor } A' \text{ para etapa } Y_2 (PR3)) \Rightarrow M_7 = [E2+E4, op.3, 0] - [0, op.3, 0] + [E6, 0, 0]$$

$$\Rightarrow M_7 = [E2+E4+E6, 0, 0].$$

$$\underline{\text{Para a marcação } M_7 = [E2+E4+E6, 0, 0]}$$

$$\text{Cálculo do vetor } Q (M_7) = [3, 0, 0];$$

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M_7 :

Pela condição 1 (Vetor A' da etapa ≤ vetor marcação) a seguintes etapa

satisfaz a condição 1:

- $Y_3 (PR3) = [E6, 0, 0] \leq [E2+E4+E6, 0, 0]$.

Executando a condição 2 para esta etapas tem-se:

- Etapa Y_2 (PR3): $Q ([E2+E4+E6, 0, 0] - [E6, 0, 0] + [0, 0, 0] + [0, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q ([E2+E4, 0, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [2, 0, 1] \leq [3, 1, 1] \leq [3, 1, 1] \therefore \text{ok.}$

A etapa atende as duas condições de habilitação e, como no exemplo do Capítulo 5, a etapa Y_3 (PR3) é disparada, assim a nova marcação M_8 será dada por:

$$\text{Vetor marcação } M_8 = (\text{vetor marcação } M_7) - (\text{vetor } A^- \text{ para etapa } Y_3 \text{ (PR3)}) + (\text{vetor } A^+ \text{ para etapa } Y_3 \text{ (PR3)}) \Rightarrow M_8 = [E2+E4+E6, 0, 0] - [E6, 0, 0] + [0, 0, 0, 0] \Rightarrow M_8 = [E2+E4, 0, 0, 0].$$

$$\underline{\text{Para a marcação } M_8 = [E2+E4, 0, 0, 0]}$$

$$\text{Cálculo do vetor } Q (M_8) = [2, 0, 1];$$

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M_8 :

Pela condição 1 (Vetor A^- da etapa \leq vetor marcação) tem-se a seguinte

etapa:

- Y_4 (PR3) = $[0, 0, 0, 0] \leq [E2+E4, 0, 0, 0]$.

Executando a condição 2 para esta etapas tem-se:

- Etapa Y_4 (PR3): $Q ([E2+E4, 0, 0, 0] - [0, 0, 0, 0] + [E7, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow Q ([E2+E4+E7, 0, 0]) \leq [3, 1, 1] \Rightarrow [3, 0, 0] \leq [3, 1, 1] \therefore \text{ok.}$

A etapa atende as duas condições de habilitação e, como no exemplo do Capítulo 5, a etapa Y_4 (PR3) é disparada, assim a nova marcação M_9 será dada por:

Vetor marcação $M_9 = (\text{vetor marcação } M_8) - (\text{vetor } A^+ \text{ para etapa } Y_4(\text{PR3}))$
 $+ (\text{vetor } A^+ \text{ para etapa } Y_4(\text{PR3})) \Rightarrow M_9 = [E2+E4, 0, \text{op.4}] - [0, 0, \text{op.4}] + [E7, 0, 0]$
 $\Rightarrow M_9 = [E2+E4+E7, 0, 0].$

Para a marcação $M_9 = [E2+E4+E6, 0, 0]$

Cálculo do vetor $Q(M_9) = [3, 0, 0].$

Obtendo etapas habilitadas para a marcação M_9 :

Pela condição 1 (Vetor A^- da etapa \leq vetor marcação) tem-se que não há

etapa habilitada. Assim, encerra-se as seqüências de disparos com todas as peças

finalizadas.

6.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este método analítico serve de base para o desenvolvimento de uma

ferramenta computacional para análise do comportamento dinâmico do sistema de

manufatura, incluindo a análise de desempenho. O fato de possibilitar a escolha da

etapa a ser disparada através de alguma política é o fator diferencial da representação

analítica em relação a representação apresentada no Capítulo 4.

O estudo de caso mostra a aplicação do algoritmo desenvolvido neste

Capítulo para mostrar o comportamento dinâmico do estudo de caso do Capítulo 5.

Este trabalho apresenta uma metodologia de modelagem de sistemas de manufatura pela concepção da visão de relacionamento entre os recursos e da visão funcional proporcionada pelo processo de fabricação.

No Capítulo 2, foi apresentada e discutida a questão da modelagem de sistemas de manufatura baseadas em Redes de Petri, sendo possível observar um distanciamento cada vez maior da representação do relacionamento entre os recursos à medida que aumenta a flexibilidade de produção.

Este distanciamento motivou o desenvolvimento de uma metodologia de modelagem capaz de proporcionar, ao mesmo tempo, uma consistente representação do objeto físico e do aspecto funcional do sistema de manufatura.

A metodologia de modelagem, proposta no Capítulo 3, tem por objetivo contemplar estas duas visões da manufatura. Assim, partindo-se de um modelo de

7.1. CONCLUSÕES

7. CONCLUSÕES

relacionamento entre os recursos e dos modelos dos processos obtêm-se a rota de cada peça na estrutura produtiva gerada na dada estrutura de produção. Destes dois modelos gera-se o modelo completo do sistema de manufatura em Redes de Petri Coloridas (Capítulo 4 e 5) ou um modelo analítico (Capítulo 6).

No Capítulo 4, tem-se um método para gerar, a partir do modelo dos recursos e dos modelos dos processos, os elementos estruturais das Redes de Petri Coloridas. Com este modelo completo do sistema de manufatura é possível de realizar-se análises qualitativas e quantitativas definidas segundo o paradigma das Redes de Petri Coloridas.

No Capítulo 5, tem-se um estudo de caso mostrando como o fluxo de marcas pela estrutura de produção é similar ao fluxo de peças pelo sistema de manufatura. O caso estudado é uma estação de trabalho composta por um *buffer* um elemento manipulador e 2 elementos de processamento, na qual são executadas as operações responsáveis pela transformação das peças PR1, PR2 e PR3 para seus estados tecnológicos finais. A complexidade deste modelo está relacionada com o fato das peças consecutivamente executadas possuírem operações distintas.

A proposta de modelar-se inicialmente o modelo dos recursos e, em seguida, os modelos dos processos, definindo a rota de cada peça na estrutura de manufatura é bastante simples e, ao nosso ver, facilmente executado mesmo por aqueles que não são especialistas em modelagem ou em Redes de Petri.

O Capítulo 6 apresenta uma formalização algébrica para se gerar o modelo completo do sistema de manufatura, possibilitando a utilização de equações para se obter o comportamento dinâmico do sistema modelado. Esta formalização serve de

base para o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação computacional dedicada aos sistemas de manufatura e baseada na abordagem proposta.

Nesta metodologia, o modelo do sistema de manufatura gerado é uma rede que apresenta um conceito de alocação de recursos diferente do conceito até agora empregado para os modelos de sistemas de manufatura baseados redes de Petri, por esta nova concepção um recurso estará alocado quando existir uma peça (marca) neste recurso (lugar).

Apesar de não ter sido feito nenhum estudo comparativo do método proposto com os métodos já empregados para a modelagem de sistema de manufatura com Redes de Petri, pode-se verificar, intuitivamente, que o modelo analítico gerado é, por ser uma representação em CPN, menor que o modelo gerado por alguns dos outros métodos.

Além disto, a concepção do modelo objeto de análise partindo do modelo de relacionamento entre os recursos e dos modelos dos processos possibilita que mesmo aqueles que não são especialistas em modelagem participem e entendam o sistema que está sendo desenvolvido.

7.2. TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho deixou em aberto, para ser definido futuramente, o estudo das propriedades dos *multi-sets* com a finalidade de viabilizar a representação das situações de montagem e, por outro lado, o estudo, em por menores, para a representação consistente de processos com operações alternativas.

O desenvolvimento direto de um modelo em CPN, segundo o paradigma de modelar o objeto físico por recursos e as marcas por peças, torna-se uma tarefa complexa, haja visto as sentenças expressas nos arcos e transições.

A sistematização da geração do modelo em CPN através do relacionamento entre os recursos contribui de maneira significativa para se desenvolver um software, com um editor gráfico, que gere automaticamente o modelo em CPN.

O modelo em CPN, gerado através da sistemática definida a partir dos modelos dos recursos e dos modelos dos processos, pode servir de base para simulações, visando a análise de desempenho, ao ser acrescentada a variável de tempo ao sistema. Para tanto, utiliza-se uma das ferramentas de CPN existente e que atenda aos requisitos do modelo gerado.

Por outro lado, pode-se gerar diretamente, conforme método desenvolvido no Capítulo 6, o modelo analítico, assim, a partir desta formalização é possível o desenvolvimento de um software simulador dedicado aos sistemas de manufatura, servindo de base para auxiliar no desenvolvimento de sistemas produtivos e para gerar estratégias e a lógica para sistemas de controle.

Uma outra possibilidade - através do software simulador desenvolvido, baseado no método apresentado no Capítulo 6 - seria iniciar-se um trabalho de otimização da sequência de produção através da definição de lógicas para o disparo das transições habilitadas.

Um trabalho adicional seria o de se fazer um estudo, em pormenores, das propriedades dos modelos em Redes de Petri Coloridas gerados e as implicações nos sistemas de manufatura.

7.3. TRABALHOS PUBLICADOS

A seguir lista-se os trabalhos publicados que envolvem as pesquisas

realizadas:

- **Modelagem de Sequenciamento de Tarefas em Operações de Montagem.** In: Applied Mechanics in the Americas. Proceedings Sixth Pan-American Congress of Applied Mechanics and Eighth International Conference on Dynamic Problems in Mechanics, Rio de Janeiro, January 1999 v6 p519-522 (4).
- **Proposta de uma Técnica de Modelagem Baseada nos Recursos Físicos do Sistema de Manufatura.** In: 4.º SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente), São Paulo, 08-10 de Setembro de 1999.
- **Modelagem, Planejamento e Análise de Sistemas de Sistemas de Manufatura Baseado nas Redes de Petri.** In: XV COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), Aguas de Lindóia de 22-26 de Novembro de 1999.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Adamou et. al, 98] Adamou, M.; Zerhouni, S.N.; Boujault, A. Hierarchical Modelling and Control of Flexible Assembly Systems Using Object-Oriented Petri Nets. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. January-February 1998 VII:11 p18-33.
- [Adelsberg et. al, 95] Adelsberg, Heimo H.; Lazansky, Jiri; Marik, Vladimir, ed. Information Management in Computer Integrated Manufacturing: a comprehensive guide to state of the art CIM solutions. Berlin, Springer-Verlag, 1995.
- [Agostinho, 95] Agostinho, Oswaldo L. Integração Estrutural dos Sistemas de Manufatura como Pré-Requisito de Competitividade. Campinas, 1995 - Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.
- [Al-Jaar et. al, 90] Al-Jaar, Robert Y.; Desrochers, Alan A. Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Nets. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v.6, n.6, December 1990 p 621-639.
- [Amaral et. al, 99] Amaral, Daniel Capaldo; Rozenfeld, Henrique. Modelagem de Empresas: conceitos básicos. (<http://www.numa.org.br/conhecimentos/ModelagemV1.htm>)
- [Banaszak et. al, 90] Banaszak, Z.; Krogh, B. H. Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems with Concurrently Competing Process Flows. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v.6, n.6, December 1990 p 724-734.
- [Barreto, 91] Barreto, Marcos R.P. CIM: um alvo em constante movimento. In: Revista Automação & Indústria, São Paulo, 1991, p.16-17.
- [Bacochio et. al, 99] Bacochio, A.; Fioroni, M. M.; Georges, M. R. R.; Souza, A. C.; Rosa, A. B.; Franco, G. N. Manufatura Ágil X Sistemas Holônicos de Manufatura. 4.º SBAI (Simpósio Brasileiro de

- Automação Inteligente), São Paulo, 08-10 de Setembro de 1999.
- Becerra, Jorge L. R. **Especificação, Projeto e Implementação de um Controlador de Célula Flexível Aplicado na Manufatura**. São Paulo, 1993. n.p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [Berio et. al, 95] Berio, Giuseppe; Leva, Antonio Di; Giolito, Piercarlo; Vernadat, Francois. **The M*-OBJECT Methodology for Information System Design in CIM Environments**. IEEB Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 25, NO.1, pp. 68-85, January 1995.
- [Bernhardt et al, 92] Bernhardt, R.; Dillman, R.; Hörmann, K.; Tierney, K., ed. **Integration of Robots into CIM**. London, Chapman & Hall, 1992.
- [Bonetto, 88] Bonetto, Roger. **Flexible Manufacturing Systems in Practice**. London, North Oxford Academic Publishers Ltd, 1988.
- [Bremer, 95] Bremer, Carlos F. **Proposta de uma Metodologia para o Planejamento e Implantação da Manufatura Integrada por Computador**. São Carlos, 1995. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- [Bruno et. al, 97] Bruno, Giorgio; Agarwal, Rakesh. **Modeling the Enterprise Engineering Environment**. IEEB Transactions on Engineering Management, Vol. 44, No. 1, pp. 20-30, February 1997.
- [Bussler, 96] Bussler, Christoph. **Specifying Enterprise Process with Workflow Modeling Languages**. Concurrent Engineering-Research and Applications. September 1996 v4 i3 p261-278 (18).
- [Camarinha-Matos et. al, 95] Camarinha-Matos, L. M.; Afsarmanesh, H. (Ed). **Balanced Automation Systems: Architectures on Design Methods**. Proceedings of the IEEE/ECLA/IFIP. London. Chapman and Hall, 1995.

- [Cantamessa et. al, 98] Cantamessa, M; Paolucci, E. Using Organizational Analysis and IDEFO for Enterprise Modelling in SMEs. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. September-October 1998 v11 i5 p416-429 (14).
- [Cao et al, 1990] Cao, Xi-Ren; Ho, Yu-Chi. Models of Discrete Event Dynamic Systems. IEEE Control Systems Magazine, pp 69-76, 1990.
- [CIM, 90] CIM - Computer Integrated Manufacturing: a working definition. Dearborn, Published CASA/SME, 1990.
- [Costa et. al, 95] Costa, Luis Sérgio Sales; Caulliriaux, Heitor M. (organizadores) **Manufatura Integrada por Computador: sistemas integrados de produção, estratégia, organização, tecnologia e recursos humanos**. Rio de Janeiro. Editora Campus. SENAI/COPPE/UFRJ, 1995.
- [Costa E et. al, 99] Costa, E.M.M.; Lima, A.M.N. Utilizando Redes de Petri Multiplexadas na Síntese de Supervisores de Sistemas a Eventos Discretos. 4.º SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente), São Paulo, 08-10 de Setembro de 1999.
- [DiLeva et al, 97] DiLeva, A; Giolito, P; Vernadat, F. The M*-OBJECT Organisation Model for Enterprise Modelling of Integrated Engineering Environments. Concurrent Engineering-Research and Applications. June 1997 v5 i2 p183-194 (12).
- [Doumeings et. al, 86] Doumeings, G.; Maisonneuve, M. C.; Brand, V. and Berard, C. Design Methodology of Computer Integrated Manufacturing and Control of Manufacturing Units. In: Computer Aided Design and Manufacturing: methods and tools. 2nd ed. Springer, Berlin/New York, 1986
- [Doumeings et. al, 93] Doumeings, G.; Chen, D.; Vallespir, B. and Fenié, P. GIM (GRAI Integrated Methodology) and its Evolutions/A Methodology to Design and Specify Advanced Manufacturing Systems. Information Infrastructure for Manufacturing, IFIP, p. 101-120, 1993.

- [Duffy et. al, 98] Duffy, Vicent G.; Salvendy, Gavriel. **Concurrent Engineering Diagnostic Model Integrating Peoples, Organization and Technology.** International Journal of Computer Integrated Manufacturing. September-October 1998 v11 i5 p461-474 (14)
- [Dwyer, 88] Dwyer, John. **MAP and TOP: advanced manufacturing communications.** New York, John Wiley & Sons, 1988.
- [Franco et. al, 99] Franco, G. N.; Batocchio, A. **Sistemas Holônicos de Manufatura: revisando seus conceitos básicos.** 4.º SBAI (Simposio Brasileiro de Automação Inteligente), São Paulo, 08-10 de Setembro de 1999.
- [Gadient et al, 97] Gadient, A.J.; Hines, L.E.; Welsh, J.; Schwalb, A.P. **Agility through Information Sharing: Results Achieved in Production Setting.** Concurrent Engineering-Research and Applications. June 1997 v5 i2 p101-111 (11).
- [Gile et. al, --] Gile, Michael R.; DiCesare, Frank. **Toward Distributed Simulation of Complex Discrete Event Systems Represented by Colored Petri Nets: a Review.**
- [Hasegawa et al, 87] Hasegawa, Kensuke; Takahashi, K.; Masuda, R.; Tange, K.; Suzuki, T. **Simulation of Discrete Production Systems based on Mark Flow Graph.** System Science vol. 13, n. 1-2, 1987, Poland.
- [Hegenberg, 66] Hegenberg, Leonidas. **Logica Simbólica.** Editora Herder, São Paulo, 1966.
- [Ho, 1989] Ho, Yu-Chi. **Scanning the Issue: Dynamics of Discrete Event Systems.** Proceedings of the IBBE, vol. 77, n. 1, pp. 3-6, January, 1989.
- [Hollingum, 86] Hollingum, Jack. **The MAP report: manufacturing automation protocol.** IFS (Publications) Ltd, 1986.
- [Horta et. al, 99] Horta, Lucas Clej; Rozenfeld, Henrique. **CAPP (Computer Aided Process Planning): conhecimentos básicos.** (<http://www.numa.org.br/conhecimentos/cappv2.htm>)

- [Inamasu, 95] Inamasu, Ricardo Yassushi. **Modelo de FMS: uma plataforma para simulação e planejamento**. São Carlos, 1995 - Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- [ISO, 95] ISO 9506-2 Information Processing Systems, Open Systems Interconnection Manufacturing Message Specification (Part2) Protocol Specification.
- [Jensen, 95] Jensen, Kurt. **Coloured Petri Nets**. Spring-Verlag, vol. 2, 1.ª Ed., New York, 1995.
- [Jensen, 96] Jensen, Kurt. **Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use**. Spring-Verlag, vol.1, 2.ª Ed., Berlin, 1996.
- [Kosanke, 95] Kosanke, Kurt. **CIMOSA - overview and status**. Computers in Industry 27, p.101-109; 1995.
- [Kovacs et. al., 95] Kovacs, I.; Moniz, A. B. **Issues on the Antropocentric Production Systems**. In: *International Conference on Architectures and Design Methods for Balanced Automation Systems. Balanced Automation Systems: Architectures on Design Methods*. Camarinha-Matos, L. M.; Afsarmanesh, H. (Ed.), Proceedings of the IEEE/IFIP, London. Chapman and Hall, 1995 p 131-140.
- [Krakauer, 87] Krakauer, J. **Smart Manufacturing with Artificial Intelligence**. Dearborn, Published CASA/SME, 1987.
- [Lee et. al., 95] Lee, Doo Yong; DiCesare, Frank. **Petri Net-Based Scheduling for Flexible Manufacturing**. In: *Petri Nets in Flexible and Agile Automation*. MengChu Zhou (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995 p149-187.
- [Lee et. al., 98] Lee, Heungsoon Felix; Stecke, Kathryn E. **Production Planning for Flexible Flow Systems with Limited Machine Flexibility**. IEE Transactions, v. 30, p669-684, 1998.
- [Li et. al., 95] Li, Shitang; Takamori, Toshi; Tadakoro, Satoshi. **Scheduling and Re-scheduling of AGV's for Flexible and Agile Manufacturing**. In: *Petri Nets in Flexible and Agile Manufacturing*.

- Automation*. MengChu Zhou (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995 p189-205.
- Liu, CM; Chien, CF; Ho, IV. **An object-oriented analysis and design method for shop floor control systems**. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. September-October 1998 v11 i5 p379-400 (12).
- [Maccarthym et. al, 93] Maccarthym, B.L.; Liu, J. **A New classification scheme for flexible manufacturing systems**. International Journal of Production Research, v.31, n. 2, p. 299-309, 1993.
- [Matsusaki, 98] Matsusaki, C.M. **Redes F-MFG (Functional Mark Flow Graph) e sua Aplicação no Projeto de Sistemas Antropocêntricos**. São Paulo, 1998, 89p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
- [Matsusaki et. al, 99] Matsusaki, C.M.; Miyagi, P.E. **F-MFG (Functional Mark Flow Graph) and Its Application in Antropocentric Systems Design**. In: XV COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), Aguas de Lindóia, 22-26 de Novembro de 1999.
- [Miyagi, 96] Miyagi, P. E. **Controle Programável: Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos**. Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 1996.
- [Miyagi et. al, 99] Miyagi, P.E.; Kogohara, M.Y.; Junqueira, F.; Riascos, L.A.M. **Metodologia FFS/MFG para Automação Balançada de Sistemas de Produção Enxuta**. In: 4.º SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente), São Paulo, 08-10 de Setembro de 1999.
- [Monfared et. al, 97] Monfared, RP; Weston, RH. **The Re-engineering and Reconfiguration of Manufacturing Cell Control Systems and Reuse of their Components**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B - Journal of Engineering Manufacture. November-December 1997 v211 i7 p495-508 (14).
- [Murata, 89] Murata, Tomoshiro. **Petri Nets: Properties, Analysis and Applications**. Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 4, April, 1989.

- [Murata, 95] Murata, Tomoshiro. Application of Petri Nets to Sequence Control Programming. In: *Petri Nets in Flexible and Agile Automation*. MengChu Zhou (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995 p43-69.
- [Palomino, 95] Palomino, Reynaldo Chile. Uma Abordagem para a Modelagem, Análise e Controle de Sistemas de Produção Utilizando Redes de Petri. Florianópolis, 1995 - Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- [Perkuschich et. al., 99] Perkuschich, Angelo; Bastos, Wellington de Araújo. Aplicação de Verificação de Modelo para a Síntese de Supervisores para Sistemas a Eventos Discretos. 4.º SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente), São Paulo, 08-10 de Setembro de 1999.
- [Porto, 90] Porto, Arthur José Vieira. Desenvolvimento de um Método de Integração do Planejamento e Controle da Fabricação e do Planejamento do Processo de Fabricação Baseada na Flexibilidade do Processo de Fabricação. São Carlos, 1990 - Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- [Proth et. al., 95] Proth, Jean-Marie; Minis, Ioannis. Planning and Scheduling on Petri Nets. In: *Petri Nets in Flexible and Agile Automation*. MengChu Zhou (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995 p109-148.
- [Rehg, 92] Rehg, James A. Introduction to robotics in CIM systems. 2nd ed. Prentice-Hall, New Jersey, 1992.
- [Rembold, 94] Rembold, U.; Naji, B.O.; Storr, A. Computer Integrated Manufacturing and Engineering. s.l., Addison-Wesley Publishing Company. 1994.
- [Reisig, 85] Reisig, W. *Petri Nets: An Introduction*. Spring Verlag, New York, 1985.
- [Santos, 96] Santos, Jânio Laurindo dos. Implementação e uso de redes fieldbus para monitoramento e controle de aplicação em tempo real. São Carlos, 1996. 160p. Dissertação (Mestrado) - EESC, USP.

- Santos Filho, Diolino J. Proposta do Mark Flow Graph Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas Integrados de Manufatura. São Paulo, 1993 - Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, USP.
- Santos Filho, Diolino J. Controle de Sistemas Antropocêntricos de Produção Baseado em Redes de Petri Interpretadas. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP.
- [Santos Filho, 93]
- Silva, J.R.; Afsarmanesh, H.; Cowan, D. D.; Lucena, C. J. P. An Object - Oriented Approach to the Design of Flexible Manufacturing System. In: *International Conference on Architectures and Design Methods for Balanced Automation Systems. Balanced Automation Systems: Architectures on Design Methods*. Camarinha-Matos, L. M.; Afsarmanesh, H. (Ed.), Proceedings of the IEEE/ECLA/IFIP, London. Chapman and Hall, 1995, p. 91-106.
- [Silva et. al, 95]
- Silva, Ricardo Dutra da. **Comunicação de dados em ambiente industrial: um protocolo para automação e controle em tempo real**. São Carlos, 1996. 190p. Dissertação (Mestrado) - EESSC, Universidade de São Paulo.
- [Silva R., 96]
- Sivaloganathan, S.; Egbuonwan, N.F.O. **Quality Function Deployment - The Technique: State of the Art and Future Directions**. *Concurrent Engineering-Research and Applications*. June 1997 v5 i2 p171-181 (11).
- [Sivaloganathan et al, 97]
- Spur, Günter; Mertins Karl et. al. **Introductory Overview**. In: *Lecture Notes in Computer Science: Information Management in Computer Integrated Manufacturing: A Comprehensive Guide to State-of-the-Art CIM Solutions*. Springer, Berlin, 1995, p.1-49.
- [Spur et. al, 95]
- Souza, Adinan de; Moscato, L.A.; Silva, J.R. **Modelagem de Sequenciamento de Tarefas em Operações de Montagem**. In: *Applied Mechanics in the Americas. Proceedings Sixth Pan-American Congress of Applied Mechanics and Eighth International Conference on Dynamic Problems in Mechanics*, Rio de Janeiro, January 1999 v6 p519-522 (4).
- [Souza et. al, 99a]

- [Souza et. al., 99b] Souza, Adinan de; Santos Filho, Diolino J.; Moscato, L.A. **Proposta de uma Técnica de Modelagem Baseada nos Recursos Físicos do Sistema de Manufatura.** In: 4.º SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente), São Paulo, 08-10 de Setembro de 1999.
- [Souza et. al. 99c] Souza, Adinan de; Santos Filho, Diolino J.; Moscato, L.A. **Modelagem, Planejamento e Análise de Sistemas de Sistemas de Manufatura Baseado nas Redes de Petri.** In: XV COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), Aguas de Lindóia de 22-26 de Novembro de 1999.
- [Suárez et al, 98] Suárez, OA; Foronda, JLA; Abreu, FM. **Standard Based Framework for the Development of Manufacturing Control Systems.** International Journal of Computer Integrated Manufacturing. September-October 1998 v11 i5 p401-415 (14).
- [Uppington et al, 98] Uppington, Gregory; Bernus, Peter. **Assessing the Necessity of Enterprise Change: Pre-Feasibility and Feasibility of Studies in Enterprise Integration.** International Journal of Computer Integrated Manufacturing. September-October 1998 v11 i5 p430-447 (18).
- [Valette et. al, 90] Valette, R; Silva, M. **A Rede de Petri: Uma Ferramenta para Automação Fabril.** In: 4.º Congresso Nacional de Automação Industrial. Anais. São Paulo, 1990 p181-200.
- [Vendrameto, 94] Vendrameto, Oduvaldo. **Bases de Conhecimento para Automação da Manufatura.** São Paulo, 1994. n.p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP.
- [Venetianer et al, 96] Venetianer, PL; Szoligay, P; Crounse, KR; Roska, T; Chua, LO. **Analogue Combinatorics and Cellular Automata - Key Algorithms and Lay-out Design.** International Journal of Circuit Theory and Applications. January 1996 v24 i1 p145-164 (20).
- [Vernadat, 93] Vernadat, François B. **CIMOSA: enterprise modelling and enterprise integration a process-based approach.** IFIP, Information Infrastructure for Manufacturing, 1993, p. 65-80.

- Vernadat, François B. **Enterprise Integration: On Business Process and Enterprise Activity Modelling**. Concurrent Engineering-Research and Applications. September 1996 v4 i3 p219-228 (10).
- [Vernadat, 96]
- Vernadat, François B. **Enterprise Modeling Languages**. ICEIMT'97 Enterprise Integration – International Consensus; EI-IC ESPRIT Project 21.859, 1997. (internet: <http://www.mel.nist.gov/workshop/iceimt'97/pap-ver3/pap-ver3.htm>)
- [Vernadat, 97]
- Viana, Luis Clovis; Rosário, João Maurício; Faure, Jean-Marc. **Performance Evaluation of Control Architectures in Industrial Automation**. In: 4.º SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente), São Paulo, 08-10 de Setembro de 1999.
- [Viana et. al., 99a]
- Viana, Luis Clovis; Rosário, João Maurício; Faure, Jean-Marc. **Performance Evaluation of Control Architectures**. In: XV COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), Aguas de Lindóia de 22-26 de Novembro de 1999.
- [Viana et. al., 99b]
- [Viswanadham et. al., 90] Viswanadham, N.; Narahari, Y.; Johnson, T.L. **Deadlock Prevention and Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems Using Petri Nets Models**. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v.6, n.6, December 1990 p 713-723.
- [Williams, 93] Williams, Theodore J. **The Purdue Enterprise Reference Architecture**. Information Infrastructure Systems for Manufacturing, IIFP, pp. 43-64, 1993.
- [Wu, 94] Wu, B. **Manufacturing Systems Design and Analysis**. Chapman & Hall, London, 1994.
- [Xing et. al., 95] Xing, Keyi; Hu, Baosheng; Chen, Haoxun. **Deadlock Avoidance Policy for Flexible Manufacturing Systems**. In: *Petri Nets in Flexible and Agile Automation*. MengChu Zhou (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995 p239-263.

- [Zelm et. al., 95] Zelm, Martin; Vernadat, François B.; Kosanke, Kurt. **The CIMOSA business modelling process.** Computers in Industry 27; p. 123-142; 1995.
- [Zhou et. al., 95] Zhou, MengChu; Zurawski, Richard. **Introduction to Petri Nets in Flexible and Agile Automation.** In: *Petri Nets in Flexible and Agile Automation.* MengChu Zhou (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995 p1-42.
- [Zimmermann, 95] Zimmermann, A. **Modeling of Manufacturing Systems and Production Routes Using Colored Petri Nets.** In: Proc. of the 3rd IASTED International Conference on Robotics and Manufacturing, Cancun, México, pp. 380-383, 1995.
- [Zimmermann et. al., 96] Zimmermann, A.; Bode, S.; Hommel, G. **Modeling and Dependability Evaluation of Manufacturing Systems Using Petri Nets.** In: 1st Workshop on Manufacturing Systems and Petri Nets, 17th Int. Conf. on Application and Theory of Petri Nets, Osaka, Japan, pp. 235-250, 1996.
- [Zimmermann et. al., 98] Zimmermann, A.; Freiheit, J. **TimeNets^{ms} - An Integrated Modeling and Performance Evaluation Tool for Manufacturing Systems.** In: IEEF International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC' 98), San Diego, USA 1998, pp. 535-540.
- [Zimmermann et. al., 98] Zimmermann, A.; Kühnel, A.; Hommel, G. **A Modeling and Analysis Method of Manufacturing Systems Based on Petri Nets.** In: Computational Engineering in Systems Applications (CESA' 98), Nabeul-Hammamet, Tunisia, April 1998, pp. 276-281.
- [Zimmermann et. al., 99] Zimmermann, A.; Hommel, G. **Modeling and Evaluation of Manufacturing Systems Using Dedicated Petri Nets.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15, 1999, pp.132-137.