

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Mecânica

Metodologia de modelagem de Sistemas Automatizados de Manufatura, utilizando Rede de Petri Virtual

ORIDES MORANDIN JUNIOR

Engenheiro Eletricista – Ênfase em Eletrônica
Mestre em Engenharia Mecânica
Doutor em Engenharia Mecânica



Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: **PROF. DR. ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**

São Carlos - S.P.
Agosto de 1999



Class.	TESE-EESC
Gutt.	3745
Tombo	18199

311.00005109

S/S 1063986

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M829m

Morandin Junior, Orides
Metodologia de modelagem de sistemas automatizados
de manufatura, utilizando rede de Petri virtual /
Orides Morandin Junior. -- São Carlos, 1999.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto.

1. Rede de Petri virtual.
2. Sistemas flexíveis de manufatura.
3. Sistemas automatizados de manufatura.
4. Sistemas de eventos discretos. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ORIDES MORANDIN JUNIOR**

Tese defendida e aprovada em 27.08.1999
pela Comissão Julgadora:



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Doutor **RENATO GOULART JASINEVICIUS**
(Bolsista Pós-Doc - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



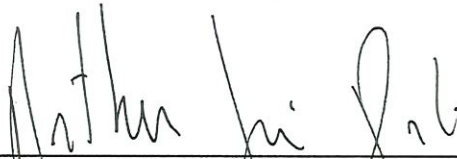
Prof. Doutor **DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



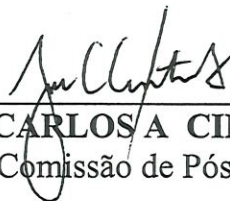
Profa. Doutora **RENATA PONTIN DE MATTOS FORTES**
(Instituto de Ciências Matemáticas e Computação - USP)



Profa. Doutora **HELOISA DE ARRUDA CAMARGO**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Aos meus sobrinhos

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto, pelo incentivo, amizade e apoio.

Ao meu “co-orientador” Dr. Ricardo Yassushi Inamasu, pelas horas de trabalho despendidas (e não foram poucas) e amizade.

Aos amigos do grupo, Edilson, Lobão, Mário, Roberto, José Luiz, Jandira, Renato, Sayuri, Ana Paula, Ana Cristina, Mamoru, Osvaldo Asato, Osvaldo Oshiro e Tanaka.

A todas as pessoas do Departamento de Engenharia Mecânica que estiveram, estão e estarão presentes em vários momentos, Ana Paula, Beth, Cristina (1), Cristina (2), Cláudio e Maragno.

Aos amigos do Departamento de Computação (UFSCar), que não são poucos, pela amizade, apoio e incentivo.

A todos os meus amigos do “Prédio” (e “frequentadores”), pela amizade, pelos ótimos momentos e excelente convivência.

Ao pessoal da Secretaria de Pós-Graduação da EESC, Andréia, Nazaré, Reinaldo (in memorian) e Sílvia por todo apoio e amizade.

Ao pessoal da gráfica a quem sempre solicitamos serviços de última hora e sempre somos muito bem atendidos.

Um especial agradecimento à Nagi, por todo carinho, apoio e compreensão.

A todas as pessoas que contribuíram com o trabalho.

Às cachoeiras da região e também ao Morro do Cuscuzeiro, pelos benefícios à mente.

RESUMO

MORANDIN Junior, Orides. *Metodologia de modelagem de Sistemas Automatizados de Manufatura, utilizando Rede de Petri Virtual.* Tese (Doutorado); Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; agosto de 1999; 139 p.

Rede de Petri (PN) tem sido extensamente utilizada como técnica de modelagem de sistemas automatizados de manufatura.

Contudo, a representação de sistemas complexos ou com grande número de componentes, utilizando-se PN, produz modelos com uma grande profusão de elementos no grafo, o que faz com que exista uma dificuldade na construção de um modelo fiel e também na sua análise.

Em função desses aspectos, algumas extensões de PN têm sido propostas com o objetivo de facilitar a modelagem e análise e, dentre as extensões existentes, evidenciam-se dois grandes grupos: o primeiro coloca novos atributos melhorando o poder de representação e o segundo implementa facilidades para representação de sistemas.

Entretanto, a inclusão de novas características na construção dessas novas extensões de PN, ainda traz algumas dificuldades para elaboração de modelos.

Diante disso, esse trabalho propõe uma nova extensão de PN, denominada Rede de Petri Virtual, para modelagem de sistemas automatizados de manufatura; uma abordagem de construção modular por elementos do sistema, procurando facilitar a modelagem de um sistema complexo; e um método de associação dos módulos gerados.

Com a utilização desse método, pode-se construir um modelo de um sistema complexo, a partir da construção de módulos representando elementos do sistema, e de uma forma de associação sistematizada, para construção do modelo geral representativo do sistema completo. Além disso, a construção de modelos por módulos permite a sua reutilização em novas modelagens.

Um exemplo de um Sistema Automatizado de Manufatura é modelado utilizando a metodologia proposta mostrando uma facilidade de modelagem pela abordagem modular considerando-se os elementos do sistema e o plano de processo e também pela facilidade de reutilização de módulos similares.

Uma característica importante na metodologia é que, apesar da introdução de uma nova extensão de PN, a PN Virtual, o modelo final gerado após a associação dos módulos, retorna à PN utilizada originalmente.

Palavras chave: Rede de Petri, Rede de Petri Virtual, Modelagem de Sistemas Automatizados de Manufatura, Sistemas Flexíveis de Manufatura

ABSTRACT

MORANDIN Junior, Orides. *Automated Manufacturing Systems modeling methodology using Virtual Petri Net.* Tese (Doutorado); Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; August, 1999; 139 p.

Petri Net (PN) has been used as a technique for modeling of automated manufacturing systems.

However, the use of PN for complex systems, or with great number of components, produces models with a great number of elements in the graph. So, it's difficult to model and analyse them.

Considering this aspect, some PN extensions have been proposed in order to facilitate the modeling and analyse job.

The PN extensions can be divided into two groups: the first deals with new attributes improving representation power, and the second, deals with new elements for systems representation.

However, the new characteristics of these PN extensions, still bringing some difficulties for system modeling job.

Considering so, this work proposes a new PN extension for automated manufacturing systems; a modular modeling approach based on the systems elements and the process planning; and a method of association of the generated modules.

Using this method, a complex system can be modeled, initially considering the systems elements for the modeling job, and then using the association method to build the complete model.

An Automated Manufacturing System is modeled using this methodology in order to present the modeling facilities using a modular approach based on the systems elements and the process planning and also considering the reuse of similar modules.

An important characteristic considered in this methodology is the momentary use of a new PN extension, the Virtual PN. After the modules association this new extension is no more present in the final model.

Keywords: Petri Net, Virtual Petri Net, Automated Manufacturing Systems Modeling, Flexible Manufacturing Systems

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - AMBIENTE DE MANUFATURA AUTOMATIZADA	8
2.1. A MANUFATURA INTEGRADA POR COMPUTADOR	9
2.1.1. Definições e funções	11
2.2. SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MANUFATURA.....	15
2.2.1. Definições e Funções	17
2.2.2. Componentes.....	20
2.2.2.1. Estações de Processamento.....	20
2.2.2.2. Sistema de Movimentação e Armazenamento de Materiais.....	21
2.2.2.3. Sistema de Controle por Computador.....	29
2.3. OUTRAS ARQUITETURAS	31
2.4. PLANO DE PROCESSO FLEXÍVEL	33
CAPÍTULO 3 - BREVE HISTÓRICO E DEFINIÇÃO DE REDES DE PETRI.....	36
3.1. DEFINIÇÃO DE REDE DE PETRI	37
3.2. ALGUMAS EXTENSÕES	40
3.3. PROPRIEDADES	43
3.3.1. Propriedades Comportamentais.....	43
3.1.2. Propriedades Estruturais	45
3.4. MÉTODOS DE ANÁLISE.....	46
3.4.1. Árvore de Cobertura	46
3.4.2. Matriz de Incidência e Equação de Estado	47
3.4.3. Técnicas de Decomposição e Redução.....	48
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÕES DE REDES DE PETRI PARA MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MANUFATURA.....	49
4.1. TRABALHOS REALIZADOS PARA MODELAGEM DE SISTEMAS DE AUTOMATIZADOS DE MANUFATURA UTILIZANDO REDE DE PETRI	52
4.1.1. Modelos de PN para “Flow Shops”	52
4.1.2. Modelos de PN de Linhas de Transferências Automatizadas	53
4.1.3. Modelos de PN de “Job Shops”	54
4.1.4. Modelos de PN para Sistemas Flexíveis de Manufatura.....	56
4.1.5. Modelos de PN para Sistemas de Montagem.....	64

CAPÍTULO 5 - PROPOSTA DE ABORDAGEM DE MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MANUFATURA, USANDO PN VIRTUAL.....	69
5.1. ESTAÇÃO DE TRABALHO	72
5.2. VEÍCULO AUTO-GUIADO	77
5.3. ROTAS OU TRAJETÓRIAS.....	78
5.4. PROCESSO ALTERNATIVO.....	84
5.5. O SISTEMA E SEU MODELO FINAL	85
5.5.1. Associação entre Modelo de Estação e de AGV.....	86
5.5.2. Associação entre Modelo de Estação e de Processo.....	88
5.5.3. Associação entre Modelo de Rotas e o Modelo Associado de Estação e AGV	89
5.5.4. Modelo Geral do Sistema.....	91
5.4. Considerações sobre associação de módulos.....	92
CAPÍTULO 6 - MÉTODO DE ASSOCIAÇÃO DOS MÓDULOS DO SISTEMA	93
CAPÍTULO 7 - EXEMPLO DE MODELAGEM DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE MANUFATURA.....	103
7.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	104
7.1.1. O Processo de Fabricação.....	105
7.2. ELABORAÇÃO DOS MÓDULOS	105
7.2.1. Módulo do Plano de Processos	105
7.2.2. Módulo de Estações	107
7.2.3. Módulo Veículo.....	107
7.2.4. Módulo Rotas	108
7.2.5. Outras Alterações nos Módulos de Modelos	108
7.3. ASSOCIAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS	109
7.3.1. Associação entre Módulo Estação e Módulo Veículo.....	110
7.3.2. Associação entre Módulo resultante (Estação ⊗ Veículo) e Módulo Rotas.....	110
7.3.2. Associação entre Módulo resultante (Estação ⊗ Veículo ⊗ Rotas) e Módulo Processo.....	110
7.4. TESTES E VALIDAÇÃO	112
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÃO	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Linha de Transferência Flexível	13
Figura 2.2 - Célula Flexível de Manufatura	14
Figura 2.3 - Sistema Flexível de Manufatura [Groover, 1987]	15
Figura 2.4 - Características de aplicação de FMS	15
Figura 2.5 - Manipuladores Mecânicos ("pega e Coloca") (Groover, 1987)	23
Figura 2.6 - Robôs Programáveis (Groover, 1987)	24
Figura 2.7 - Veículo Auto-Guiado (Bose, 1986)	24
Figura 2.8 - Transportador de Roletes	26
Figura 2.9 - Desvio em Transportador de Roletes (Tronco, 1992)	26
Figura 2.10 - Sistemas AS/RS (Tronco, 1992)	27
Figura 2.11 - Armazenamento "Car-in-Lane" (Tronco, 1992)	28
Figura 2.12 - Carrosséis (Tronco, 1992)	28
Figura 2.13 - "Job Shop" (Desrochers e Al-Jaar, 1997)	32
Figura 2.14 - "Flow Shop" (Desrochers e Al-Jaar, 1997)	32
Figura 2.15 - Folhas de processo de fabricação: a) ilustração simplificada de uma folha de processo; b) ilustração simplificada de um plano de processo	33
Figura 2.16 - Caminhos alternativos para execução de plano de processo	34
Figura 3.1 - Modelo de operação de máquina com troca de ferramentas usando Rede de Petri Lugar/Transição.	38
Figura 3.2 - Modelo da figura 3.1 depois do disparo de t_1	39
Figura 3.3 - Modelo da figura 3.1 com plano de processo alternativo usando uma segunda máquina.	39
Figura 3.4 - Modelo da figura 3.3 com sucessivas aplicações de regras de redução. A primeira redução é a fusão de transições e lugares em série (a). A segunda é outra fusão de transições em série(b). A terceira usa eliminação de "self-loop" (c).	40
Figura 3.5 - Marcas e expressões em PN Colorida.	41
Figura 3.6 - Modelo de operação de máquina com troca de ferramentas utilizando PN Colorida.	41
Figura 3.7 - Modelo da figura 3.1 subdividido em três sub-modelos, adicionado a possibilidade de identificar a peça.	42

Figura 3.8 - Exemplos de transformações de PN (Murata, 1989)	48
Figura 5.1 - Esquema da metodologia de modelagem proposta	70
Figura 5.2 - Estação de trabalho e veículo, com suas áreas em comum	72
Figura 5.3 - Modelo em PN de uma estação de trabalho para apenas uma peça, sem elementos de controle.	73
Figura 5.4 - Modelo em PN de uma estação de trabalho para apenas uma peça, com elementos de controle.	75
Figura 5.5 - Modelo em PN de uma estação de trabalho para três peças, com elementos de controle.	75
Figura 5.6 - Modelo em PN de uma estação de trabalho sem buffer, com elementos de controle	76
Figura 5.7 - Modelo de um AGV para representar posicionamento de uma peça.	77
Figura 5.8 - Modelo de um AGV para representar posicionamento de três peças.	78
Figura 5.9 - Exemplo de um “layout” de Sistema Automatizado de Manufatura	79
Figura 5.10 - Modelo de PN de rotas para o “layout” da figura 5.9	80
Figura 5.11 - Modelo de trechos de rota para dois AGVs, construído a partir do modelo da figura 5.10 (Trecho de rota entre as estações 1, 2 e 3).	82
Figura 5.12 - Modelo de rotas para o “layout” da figura 5.9, para dois AGVs.	83
Figura 5.13 - Modelo de uma etapa de um processo alternativo de fabricação.	85
Figura 5.14 - Modelo em PN representando a associação de uma estação e um AGV, ambos com “buffer” para três peças.	86
Figura 5.15 - Modelo simplificado da associação entre Estação e AGV	87
Figura 5.16 - Associação entre os modelos de estação e de processos.	88
Figura 5.17 - Trecho do modelo de rotas, com descrição de pontos de carga e de descarga de peças	90
Figura 5.18 - Modelo simplificado, representante da associação entre estação, veículo e rota, para um trecho da rota. (Montado a partir das figuras 5.15 e 5.17)	90
Figura 5.19 - Modelo associando os quatro módulos (estação, veículo, rotas e processo, para um trecho de rota	91
Figura 6.1 – Representação de nós (lugares e transições) numa PN Virtual	96
Figura 6.2 - Representação de módulos com elementos virtuais	97
Figura 6.3 - Exemplos de associação entre módulos: i] um lugar virtual do módulo a, com alvo em um lugar (não virtual) do módulo b; ii] um lugar virtual e duas transições virtuais de um módulo	

a , com alvo em um lugar e duas transições de um módulo b ; iii] um lugar virtual de um módulo a , com um alvo em um módulo b , e duas transições virtuais de um módulo b , com alvos em um módulo a 99

Figura 6.4 - Exemplos de associação entre módulos: i] um lugar virtual do módulo a , com alvo em um lugar virtual do módulo b ; ii] um lugar virtual e duas transições virtuais de um módulo a , com alvo em um lugar virtual e duas transições (não virtuais) de um módulo b ; iii] um lugar virtual e duas transições virtuais de um módulo a , com alvo em um lugar virtual e duas transições virtuais de um módulo b ; iv] duas transições virtuais e um lugar virtual de um módulo a , com alvo em duas transições virtuais e um lugar (não virtual) em um módulo b .	101
CÓPIA da Figura 5.9 - Exemplo de um “layout” de Sistema Automatizado de Manufatura.....	104
Figura 7.1 – Modelo de Processo Alternativo.....	106
CÓPIA da Figura 5.4 - Modelo em PN de uma estação de trabalho para apenas uma peça, com elementos de controle.....	107
CÓPIA da Figura 5.7 - Modelo de um AGV para representar posicionamento de uma peça.	108
Figura 7.2 - Modelo final do Sistema Atomatizado de Manufatura.....	111

GLOSSÁRIO E SIGLAS

AGV	Veículo Auto-Guiado (“Automated Guided Vehicle, Automatic Guided Vehicle”)
AGVS	Sistema de Veículo Auto-Guiado
AMS	Sistema Automatizado de Manufatura (“Automated Manufacturing System”)
AS/RS	Armazenamento Automático e Sistema de Recuperação (“Automatic Storage and Retrieval System”)
“Bottom-up”	“de baixo para cima”: Usado no texto indicando tipo abordagem de montagem de modelos “de baixo para cima”, ou de um nível inferior e mais detalhado para um nível superior e mais macroscópico.
“Buffer”	local de armazenamento
CAD	Projeto Auxiliado por Computador (“Computer Aided Design”)
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador (“Computer Aided Engineering”)
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador (“Computer Aided Manufacturing”)
CAPP	Planejamento de Processo Auxiliado por Computador (“Computer Aided Process Planning”)
CIM	Manufatura Integrada por Computador (“Computer Integrated Manufacturing”)

CNC	Comando Numérico Computadorizado
FMC	Célula Flexível de Manufatura (“Flexible Manufacturing Cell”)
FMS	Sistema Flexível de Manufatura (“Flexible Manufacturing System”)
Intertravamento	No texto, se refere ao conjunto de ações e seus pré-requisitos que descrevem e controlam o funcionamento de partes de máquinas ferramenta.
“Just-in-time”	No texto, se refere a um sistema de produção que visa minimizar inventário.
LAN	Rede Local (“Local Area Network”)
MRP	Planejamento de Requisitos de Material (“Material Requirements Planning”)
MRP II	Planejamento de Recursos de Gerenciamento (“Management Resources Planning”)
“Overflow”	No texto, se refere à ultrapassagem da capacidade de armazenamento de um determinado dispositivo ou local.
“Pallet”	Dispositivo especial para transporte de peças e que pode ser manipulado por elementos de um sistema de movimentação.
“Set-up”	No texto, se refere a preparação e ajuste de máquinas ferramenta para execução de uma determinada tarefa.
WAN	Rede Geográfica (“Wide Area Network”)

Observação: Alguns termos utilizados na tese não constam desta lista, por serem considerados termos comumente empregados.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a sociedade vem sofrendo algumas transformações em relação a vários aspectos, com uma velocidade bastante alta.

Uma das novas características que se apresenta no momento é a globalização que, se por um lado tem sido causada por algumas mudanças, por outro, tem sido também causadora de outras mudanças.

No que diz respeito às indústrias dos mais diversos segmentos, tem havido um aumento na concorrência cada vez mais evidenciada e uma busca, por parte de consumidores, por uma maior diversidade de produtos, com preços mais baixos e também com melhor qualidade.

Isso tem promovido uma mudança na sistemática de trabalho das indústrias, objetivando atender com maior eficiência e eficácia essas necessidades e tendências.

Dentre as várias alterações que estão sendo implementadas, pode-se citar algumas inovações tecnológicas advindas do crescente uso de equipamentos computacionais no apoio a realização de uma série de tarefas.

Uma inovação tecnológica significativa, que se pode destacar, é uso ou implementação de automação em todos os níveis das indústrias.

Especificamente, no “chão de fábrica”, vários modelos de sistemas automatizados têm sido implementados, e podem ser classificados considerando-se diferentes aspectos, porém, de uma maneira geral podem ser referidos como “Sistemas Automatizados de Manufatura”.

Nesse sentido, um Sistema Automatizado de Manufatura é caracterizado como sendo um sistema controlado por computador que pode fabricar, transportar e armazenar simultaneamente uma variedade de peças e produtos. A implementação de elementos automatizados para esses fins tem resultado em sistemas mais complexos e que necessitam de modelos também mais complexos.

Historicamente, os modelos de sistemas de manufatura têm sido desenvolvidos em etapas, começando com modelos matemáticos, como Cadeias de Markov e Modelos de

Fila e, finalizando com modelos de simulação detalhados (Moore e Gupta, 1996 apud Desrochers, 1990).

Cadeias de Markov são aplicadas adequadamente para a modelagem e análise de sistemas de manufatura altamente estruturados, bem definidos e pequenos tais como “flow shops” e linhas de transferência. Modelos de Fila podem ser aplicados a grandes “flow shops” e linhas de transferência. Ambas as técnicas podem ser usadas para determinar as probabilidades, em regime, do estado do sistema, incluindo as probabilidades de ocorrência de conflito e “overflow” e para avaliação de tamanho de “buffer”.

Essas técnicas também podem ser usadas para calcular várias medidas do sistema como utilização de máquinas e atrasos. Entretanto, Cadeias de Markov e Modelos de Fila têm uma explosão no espaço de estados e limita a representação de grandes modelos.

Uma maneira de representar grandes sistemas é decompô-los em sub-sistemas e desenvolver Cadeias de Markov ou Modelos de Fila, para cada sub-sistema, independentemente. Embora isso possa ser usado para a análise de desempenho quantitativa e qualitativa dos subsistemas, os modelos não representam as interações que originalmente existem entre cada um. Assim, pode-se inferir erroneamente que o comportamento do sistema como um todo tenha um determinado desempenho, baseado no desempenho dos sub-sistemas.

Uma outra técnica possível para ser empregada é a simulação, cuja principal vantagem é a de que o sistema pode ser inteiramente modelado, mesmo sendo feito por sub-sistemas, e o impacto das interações são preservadas. Uma vantagem é que um modelo de simulação pode ser bastante realístico em relação ao sistema. Por outro lado, simulação pode ser custosa para desenvolver e executar. Além disso, a simulação não avalia muitos dos aspectos qualitativos do sistema tais como conflito e condições de “overflow” de “buffer” (Moore e Gupta, 1996).

Redes de Petri (PNs) têm sido utilizadas como uma técnica promissora para modelagem de ambientes de manufatura automatizados. PNs é uma técnica de modelagem matemática com representação gráfica desenvolvida por Petri em 1962 para modelar

operações de sistemas de computação concorrentes. Desde então, têm sido estendidas e aplicadas a uma grande variedade de sistemas (Murata, 1989; Moore e Gupta, 1996).

Como uma ferramenta gráfica, PNs servem como uma técnica de modelagem visual e como auxílio à comunicação para descrição de modelos. Como uma ferramenta matemática, PNs podem ser usadas para montar equações de estado, equações algébricas, simulações e outros modelos matemáticos.

PNs são úteis para modelagem de sistemas automatizados de manufatura que podem ser caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos e cujas operações utilizam recursos compartilhados (Desrochers, 1997).

As maiores vantagens de PNs sobre cadeias de Markov e modelos de Fila são (Moore e Gupta, 1996):

- Podem representar muitos estados de uma maneira concisa;
- Capturam relações precedentes e interações estruturais;
- Podem modelar conflitos e tamanho de “buffers”;
- Podem modelar restrições de múltiplos recursos;
- Possuem uma fundamentação matemática que pode ser utilizada para análise de desempenho quantitativa e qualitativa de sistemas;
- Podem ser convertidas diretamente em modelos de simulação; e
- Uma vez que são derivadas do sequenciamento lógico do sistema e são grafos, podem ser facilmente interpretadas.

Para Sistemas Automatizados de Manufatura, PN é aplicada com sucesso para partes do sistema tais como, Sistemas de Transporte por AGVs (estudo de prevenção de colisão e conflito, intertravamento de máquinas, identificação de conflito no fluxo de peças, sistema de gerenciamento de buffer, plano de processo alternativo e outros, auxiliando na busca por soluções de projeto e controle de tais sub-sistemas (desrochers, 1997, Moore e Gupta, 1996).

Entretanto, a busca para união de forma “convencional” dos modelos em PN desses sub-sistemas traz uma grande profusão de elementos gráficos e nomes, tornando sua interpretação muito difícil e complexa.

Algumas regras aplicadas no “manuseio” desses modelos, tais como regras de redução, aumentam a abstração, mas não são aplicáveis a todos os casos.

Para minimizar os problemas citados anteriormente, muitas extensões de PN têm sido propostas e podem ser divididas em dois grupos (Moore e Gupta, 1996). O primeiro grupo introduz novos atributos que aumentam seu poder, tais como: PN Estocástica, PN Orientada a Objeto e PN com Lógica Nebulosa. Um outro grupo aumenta a facilidade para projeto de sistemas, tais como: “Mark Flow Graph” (MFG), “Sequential Function Chart” (SFC), PN Colorida, PN Hierárquica, PN Modular e outras. O MFG e o SFC são extensões que usam algumas representações gráficas diferentes para aumentar a facilidade na representação de sistemas de automação. Uma outra extensão, a PN Colorida, permite a identificação das marcas.

Um sistema complexo pode ser modelado, por exemplo, por marcas individualizadas e pode gerar um modelo pequeno. Entretanto, um modelo compacto não é sinônimo de modelo simples ou fácil de analisar.

Uma outra extensão que introduz simplificação e resulta em modelos compactos é a PN Modular, na qual um grande modelo pode ser subdividido em vários sub-modelos, ou em módulos. A estratégia é criar elementos globais (lugares e transições) dentro dos módulos. Os elementos globais têm “visibilidade” em mais que um módulo. Assim, marcas fluem de um módulo para outro. Essa abordagem permite focalizar apenas alguns estados interessantes, em um dado momento, para um estudo particular antes da avaliação completa.

Apesar disso, essa abordagem ainda traz algumas dificuldades para a elaboração dos módulos, pois deve-se construí-los com todas as associações previamente resolvidas. Baseado nisso, o caminho que se tem tomado é a construção de um modelo geral, com uma representação hierarquicamente superior, seguido de uma identificação de possíveis

elementos globais com uma quebra em módulos e, posteriormente, faz-se o refinamento dos módulos considerando-se maiores detalhes.

Com essa abordagem, não sistematizada, uma outra consequência, além da dificuldade para elaboração do modelo, é a pouca reutilização de modelos já elaborados, testados e validados.

Resumindo, apesar da existência de várias extensões de PN e técnicas de modelagem, ainda persiste o problema de representação, análise e interpretação de sistemas complexos.

Diante desse panorama, esse trabalho propõe uma contribuição para a solução desse problema na forma de uma metodologia de modelagem de Sistema Automatizado de Manufatura, baseada no processo de fabricação, e que usa:

- uma abordagem de modelagem modular, por elementos do sistema;
- uma nova extensão de PN, chamada de PN Virtual;
- um método de associação dos módulos de modelos de PN Virtual.

A utilização dessa metodologia visa a modelagem de sistemas complexos de forma mais simples e direta.

Com a utilização dessa extensão de PN será possível construir um modelo de um sistema complexo a partir da construção de módulos (por elemento representado) e de uma método de “montagem” do modelo geral representativo do sistema completo. Além disso, a construção de modelos por módulos permitirá a sua reutilização em novos modelos com elementos similares.

Para isso, uma seqüência de exposição de conceitos, técnicas e propostas é apresentada a partir dos próximos capítulos.

No capítulo 2 são abordados os conceitos encontrados em ambientes de manufatura automatizados, assim como as formas usuais de arquiteturas e os recursos utilizados.

O capítulo 3 apresenta uma breve revisão sobre Redes de Petri, sua representação informal assim como a formal, e as técnicas de análise utilizadas para extrair medidas de desempenho de modelos. Também são apresentadas algumas extensões de PNs comumente encontradas.

Na seqüência, o capítulo 4 mostra uma breve revisão sobre as aplicações de PN na modelagem de ambiente de manufatura automatizada.

Utilizando-se as exposições feitas nos capítulos anteriores mostra-se, no capítulo 5, uma proposta de abordagem de modelagem de elementos de manufatura automatizada, usando PN modulares por elemento do sistema, chamada de PN Virtual.

No capítulo 6 é apresentada a proposta da nova extensão de PN, sua validação e também o método de “montagem” do modelo geral a partir dos módulos.

No capítulo 7, um exemplo de um Sistema Automatizado de Manufatura é modelado utilizando a metodologia proposta e seu modelo é então testado e validado.

Finalmente, no capítulo 8, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho realizado e as sugestões de continuidade do tema.

AMBIENTE DE MANUFATURA AUTOMATIZADA

Existem dois aspectos a se considerar no desenvolvimento que ocorrem na Manufatura Automatizada (Gunn, 1981). O primeiro diz respeito ao Controle e Planejamento, onde o interesse é em relação ao processamento de informações e ao controle das operações de Manufatura, de acordo com o planejamento estratégico do gerenciamento da Manufatura.

O segundo aspecto é relativo ao processo ou operações de Manufatura, onde recentes avanços, caracterizados pela automação dos recursos (máquinas, transportadores, etc.), têm trazido ganhos significativos na produtividade e menor custo para o produto.

De um modo geral, esse desenvolvimento, ocorrido através da introdução de novas tecnologias organizacionais e produtivas, tornou-se vital para que as empresas de Manufatura pudessem sobreviver em um mercado cada vez mais competitivo e integrado com as principais economias mundiais.

Essas novas tecnologias estão sendo desenvolvidas e aplicadas utilizando o conceito de CIM (“Computer Integrated Manufacturing” - Manufatura Integrada por Computador). Com a introdução dessas tecnologias, as empresas esperam aumentar sua vantagem competitiva, fabricando produtos com alta qualidade, a preços competitivos e atendendo rapidamente às variações da demanda do mercado.

2.1. A MANUFATURA INTEGRADA POR COMPUTADOR

Os Sistemas de Fabricação ou Manufatura de bens industriais têm sofrido grandes alterações nos últimos anos. Durante muito tempo a busca de grande produtividade só encontrava solução nas fabricações de grandes lotes.

O custo da tecnologia de automação rígida podia ser rateado pelo grande número de peças, e o gerenciamento da produção era grandemente facilitado pela baixa diversificação.

Para indústrias que trabalhavam com lotes pequenos e médios, a situação era adversa. O acesso à tecnologia mais eficiente era vetado pelo custo das máquinas automáticas rígidas, as quais têm difícil adaptação a mudanças freqüentes de lotes.

Além disso, a proliferação de ordens de serviços elevava o custo do material em processo e tornava caótico o gerenciamento da produção, porque o fluxo de informações era também caótico.

Uma verdadeira revolução não acontece por acaso e é causada pelo desenvolvimento tecnológico, e pela existência de um mercado consumidor à procura de maior qualidade e menor custo. Por trás de todo esse desenvolvimento tecnológico está o crescente uso e desenvolvimento da informática, proporcionando uma automação flexível por programação.

Nesse tipo de automação existem dois fatos que se destacam: a flexibilidade, permitindo a fabricação eficiente de lotes pequenos, e a integração que permite a interligação física, lógica e funcional dos equipamentos.

Nesse ambiente, surgiu o conceito de Manufatura Integrada por Computador, caracterizado pela aplicação de sistemas computacionais na automação do ciclo completo da Manufatura, que se estende por todos os estágios da produção (Agostinho, 1989a, 1989b).

Com base nesse conceito, o sistema total é encarado como processo único, no qual um grande número de informações relativas a todas as atividades é rapidamente tratado. A fábrica torna-se então flexível e previsível.

Aliado a essas condições, a descoberta de novos materiais, o rápido desenvolvimento da micro-eletrônica e a árdua competição internacional, entre outros fatores, também têm provocado uma grande pressão nos diversos setores produtivos no sentido de serem mais flexíveis e competitivos.

2.1.1. Definições e funções

O termo CIM refere-se ao uso integrado de computadores em todas as seções de uma empresa, desde o planejamento da produção, passando pelo projeto e manufatura de um produto, até a garantia de boa qualidade (Kochan, 1986).

Segundo Agostinho (1989a, 1989b), os elementos técnicos de CIM podem ser classificados em cinco categorias principais: projeto, manufatura, planejamento e controle da produção, tecnologia de movimentação de materiais e tecnologia de integração. Esses elementos são descritos a seguir:

1. **Projeto** compreende:
 - Projeto Auxiliado por Computador (CAD);
 - Engenharia Auxiliada por Computador (CAE);
 - Planejamento de Processos Auxiliado por Computador (CAPP);
 - Programação CNC (Comando Numérico Computadorizado) Auxiliada por Computador;
2. **Manufatura**, também conhecida como Manufatura Auxiliada por Computador (CAM), compreende os equipamentos e máquinas utilizadas para produção de peças e produtos;
3. **Planejamento e Controle da Produção** compreende as tecnologias do planejamento das reservas disponíveis (MRP, ou Planejamento de Requisitos de Material, MRPII, ou Planejamento de Recursos para Manufatura, etc.), a distribuição desses recursos e as metodologias para Produção "Just-in-Time";
4. **Tecnologia de Movimentação de Materiais** compreende o desenvolvimento e aplicação de tecnologias ligadas à estocagem, distribuição e movimentação de materiais em bruto e acabados;
5. **Tecnologias de Integração** compreende os sistemas de comunicação computacionais para congregar e juntar informações de partes isoladas da fábrica. Esses sistemas computacionais incluem "hardware", "software" e redes especializadas (LAN, ou Rede Local, WAN, ou Rede Geográfica, etc.).

A Manufatura Integrada por Computador caracteriza-se portanto, como um sistema de informação e controle de Manufatura, cujos benefícios resultam dos investimentos na implementação de tal tecnologia. Esses benefícios são (Tronco, 1992):

- **mudanças na estrutura de custos**, relacionadas basicamente com a substituição do trabalho humano pelas máquinas e redução de custos variáveis;
- **aumento da repetibilidade dos processos**, o qual tem impacto competitivo devido à redução do trabalho de correção e melhoria de desempenho dos produtos;
- **redução de inventários**, através de redução de tempo de montagem, minimizando a necessidade de estoques;
- **aumento da flexibilidade**, através de rápidas trocas de ferramentas e equipamentos, possibilitando mudanças de produto rapidamente em resposta às variações de demanda de mercado;
- **redução de tempo de trânsito entre as estações de processamento**, através da redução de distâncias de movimentação de materiais e otimização das rotas a serem seguidas pelos mesmos.

As estratégias para implementação do CIM em indústrias incluem estágios ou níveis de integração, os quais podem ser definidos como segue (Meredith e Hill, 1987):

O *nível 1* é definido como "padrão", ou "unitário". Esse nível representa o "hardware" padrão que é comumente controlado por computadores contidos nas máquinas ou controladores programáveis. Incluem componentes como AGVs, Máquinas Ferramenta CNC, Robôs e outros equipamentos com necessidades limitadas de informações locais.

O *nível 2* consiste de grupos celulares de equipamentos e materiais para a produção de famílias de peças, e têm um alto grau de integração e comunicação. Esses grupos celulares são compostos por unidades de equipamentos individuais do nível 1, conectadas de uma maneira que permite realizar tarefas múltiplas, porém ordenadas, em uma família de peças. Esses grupos celulares (ou células) realizam uma variedade de funções, através da habilidade existente para troca de informações permitida pela integração do sistema.

No *nível 3* de integração, algumas células do nível 2 são conectadas para produzir ilhas, ligadas tipicamente através de redes computadorizadas de informação. A flexibilidade das ilhas oferece vantagens competitivas, tais como facilidade e rapidez para gerar novos produtos.

O *nível 4* é o de integração total, onde todas as funções de manufatura e todas as interfaces são ligadas através de grandes redes de informação. Esse nível inclui todos os sistemas do nível 3, assim como equipamentos de transporte, departamentos funcionais e níveis de gerenciamento. Esse nível de integração representa o conceito de CIM.

Dentro desse sistema de integração caracterizado como CIM, verifica-se que, no **nível do chão de fábrica**, segundo uma classificação geral das estruturas de produção, pode-se reunir as principais categorias em três grupos (Agostinho, 1989b):

- Linhas de Transferência Flexíveis;
- Células Flexíveis de Manufatura;
- Sistemas Flexíveis de Manufatura.

As **Linhas de Transferência Flexíveis** são normalmente utilizadas para fabricação em alta escala, diferindo das linhas tradicionais pela possibilidade de produção de peças diferentes. A figura 2.1 ilustra uma Linha de Transferência Flexível.

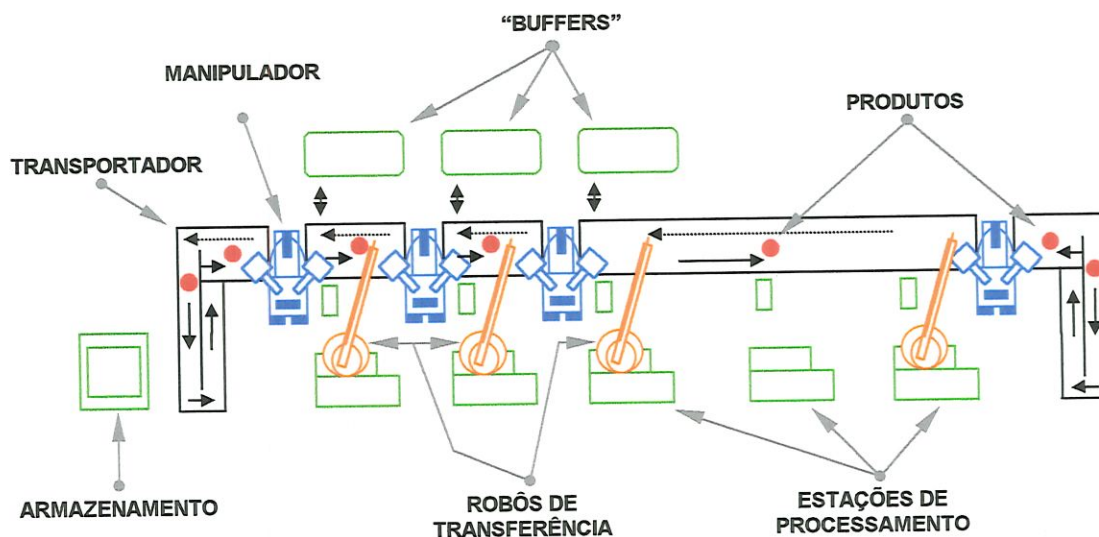


FIGURA 2.1 - Linha de Transferência Flexível

As **Células Flexíveis de Manufatura** são utilizadas na produção de peças individuais ou pequenos lotes de peças. São extremamente versáteis quanto a mudanças de tipos de peças; uma vez disparado o processo de fabricação, a célula realiza todas as operações necessárias, sendo que, para alterar o tipo de peça, basta alterar a programação de seus recursos componentes. A figura 2.2 ilustra uma Célula Flexível de Manufatura.

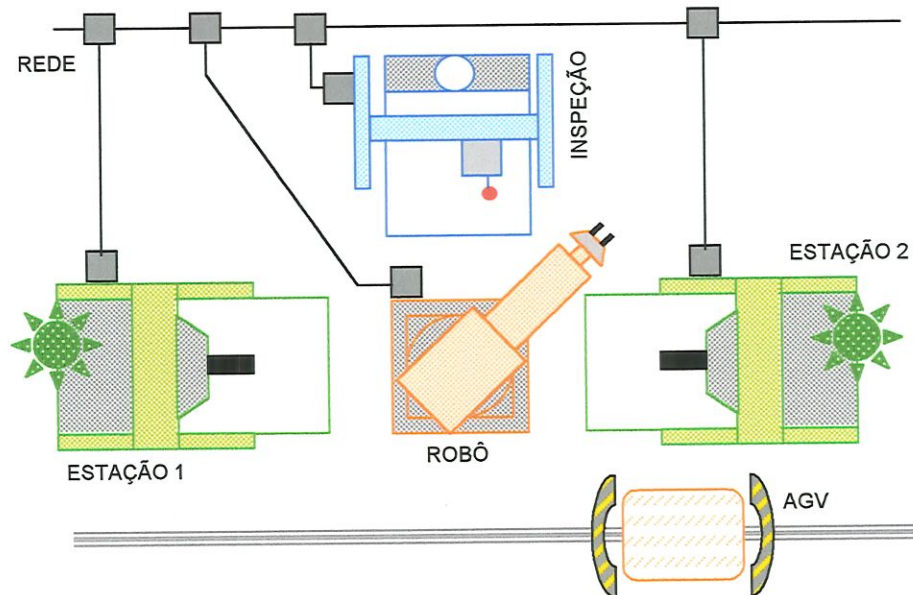


FIGURA 2.2 - Célula Flexível de Manufatura

O **Sistema Flexível de Manufatura** permite a produção de volumes diferentes de peças também diferentes, sendo composto por estações de processamento interligadas por sistemas de manipulação de materiais automáticos. A figura 2.3 apresenta uma planta de um Sistema Flexível de Manufatura.

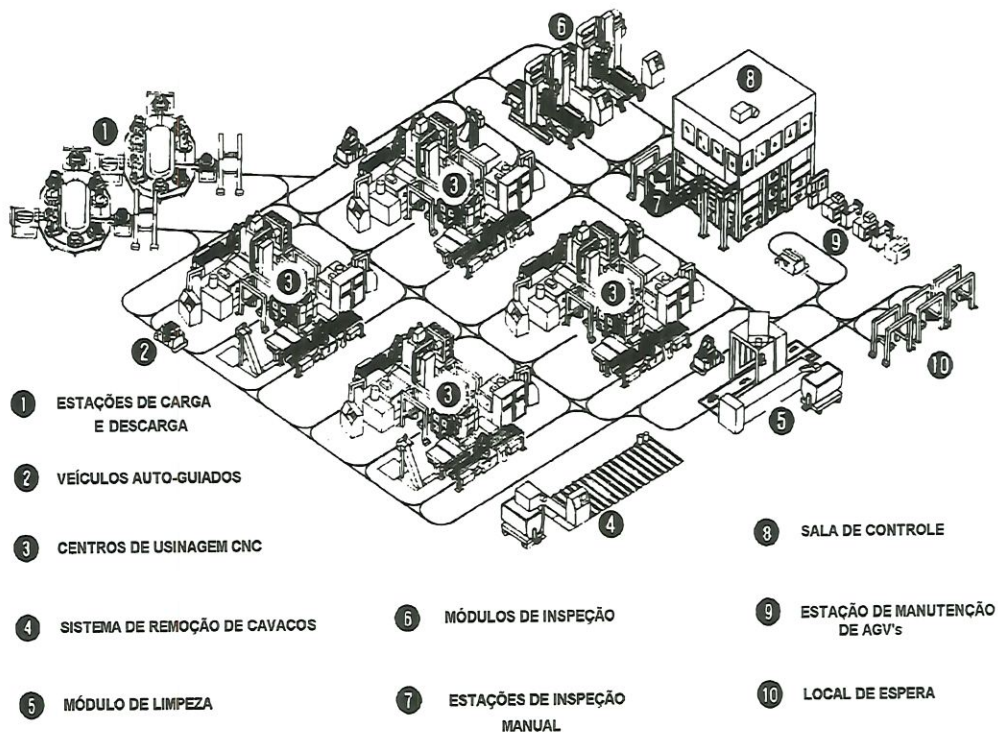


FIGURA 2.3 - Sistema Flexível de Manufatura [Groover, 1987]

2.2. SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MANUFATURA

Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS) preenchem uma lacuna existente entre Linhas de Transferência de alta produção e Máquinas NC (Comando Numérico) de baixa produção (figura 2.4).

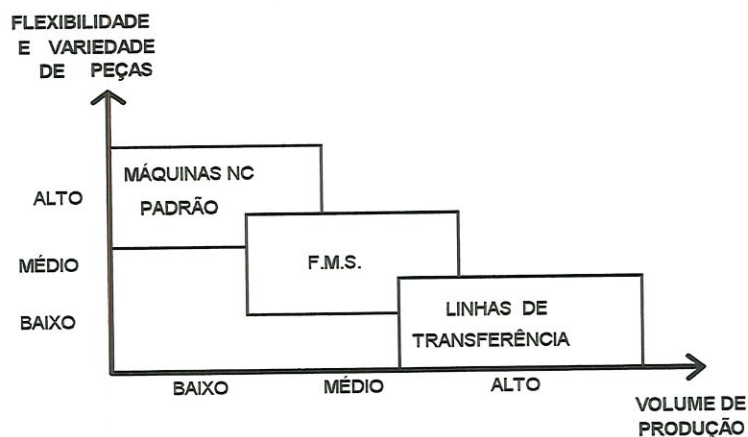


FIGURA 2.4 - Características de aplicação de FMS

Pode-se observar que existem diferentes características, no que diz respeito ao volume e flexibilidade para fabricação de peças, em função do sistema de produção.

As Linhas de Transferência são muito eficientes quando se está produzindo peças em grandes volumes e altas taxas de produção. A limitação nesse modo de produção é que as peças devem ser idênticas. As linhas altamente mecanizadas são inflexíveis e não podem tolerar mudanças no projeto da peça (Kochan, 1986).

Uma mudança no projeto requer que a linha seja inteiramente paralisada e readaptada. Se as mudanças no projeto são grandes, a linha pode vir a ser considerada obsoleta.

Por outro lado, as Máquinas NC são idealmente apropriadas para variações na configuração da peça de trabalho. Máquinas NC são adequadas para centros de produção de pequenos lotes, uma vez que podem ser convenientemente reprogramadas para operar com trocas de produtos e mudanças no projeto das peças.

Em termos de eficiência e produtividade, existe uma lacuna entre as Linhas de Transferência e as Máquinas NC altamente flexíveis. A lacuna é a produção de peças em médios volumes. Nesse caso o equipamento de produção deve ser flexível o bastante para movimentar uma variedade limitada de peças.

Linhas de Transferência não são apropriadas para essa aplicação já que são inflexíveis. Máquinas NC também não são apropriadas para essa aplicação porque suas taxas de produção são baixas.

A solução para esse problema de produção de médio volume são os Sistemas Flexíveis de Manufatura.

2.2.1. Definições e Funções

Um Sistema Flexível de Manufatura é um agrupamento de equipamentos, considerados como estações de processamento, interligados por um sistema automatizado de carga e descarga e de movimentação de peças e ferramentas. Todo o sistema é controlado por computador (Agostinho, 1989a).

O objetivo de um FMS é produzir de maneira eficiente, diferentes tipos de peças em volumes médios e baixos. Todas as atividades no Sistema, tais como, corte de metais, monitoração de desgaste de ferramentas, carga, descarga, planejamento e programação, são feitas por controle computacional em tempo real.

Em operação, o FMS é uma fábrica automatizada em miniatura. Dependendo do arranjo físico, os FMSs podem ser empregados para produções variadas, desde a produção individual até a produção em larga escala.

Esses FMSs incorporam portanto muitos conceitos individuais de automação e tecnologias dentro de um único sistema de produção, tais como: movimentação automática de materiais entre máquinas, Máquinas Ferramenta CNC, controle computadorizado sobre o sistema de movimentação de materiais e Máquinas Ferramenta DNC (Comando Numérico Direto), e princípios de Tecnologia de Grupo.

O FMS é capaz de controlar a fabricação de peças simultaneamente, nas várias estações de processamento.

O trabalho humano é usado para apoiar as operações do FMS, e suas funções básicas são as seguintes:

- Carregar peças brutas no sistema;
- Descarregar peças acabadas do sistema;
- Trocar e fixar ferramentas (em alguns casos);
- Manutenção e reparo de equipamentos.

Além disso o operador pode ser requisitado para introduzir dados, trocar partes de programas, e realizar outras tarefas relacionadas ao sistema computadorizado de controle.

As peças de trabalho são carregadas e descarregadas em uma região central no FMS. "Pallets" são utilizados para transferir as peças entre máquinas.

Uma vez que uma peça é carregada no sistema de movimentação, ela é automaticamente roteada para as estações de processamento requisitadas para sua fabricação.

Para cada tipo de peça, o roteamento pode ser diferente, e as operações e ferramental requisitados para cada estação de trabalho também poderão ser diferentes.

A coordenação e controle das peças em movimento e atividades de processamento são realizadas sob o comando do computador. Um ou mais computadores podem ser usados para controlar um único FMS. As funções do computador podem ser agrupadas como segue:

- Controle computacional para as máquinas individuais (CNC);
- Controle Numérico Direto de todas as Máquinas Ferramenta no FMS (DNC);
- Controle Computacional do Sistema de Movimentação e Armazenagem de Materiais;
- Monitoração de dados de produção tais como contagem de peças, trocas de ferramentas, utilização de máquinas, etc.;
- Controle Supervisor, através de funções relacionadas ao controle de produção, controle de tráfego, controle de ferramentas, etc.

O computador utilizado para controle pode ser programado para determinar rotas alternativas para peças, quando uma das máquinas no FMS falha.

A seguir é apresentada uma lista de problemas para os quais a aplicação do conceito de FMS pretende resolver.

a. Produção de famílias de peças

Um FMS é desenvolvido para se adaptar a uma variedade de projetos de peças. A versatilidade do FMS não é tão grande quanto a das Máquinas NC. Ele

aplica o conceito de tecnologia de grupo para produção de várias famílias de peças na mesma série de máquinas.

b. Lançamento aleatório de peças no sistema

Lançamento aleatório significa que qualquer peça entre as famílias de peças movimentadas pelo FMS pode ser introduzida no sistema sem perda de tempo para inicialização.

Quando a peça é introduzida na linha, ela é identificada no sistema de controle computadorizado, o qual a roteia às máquinas apropriadas no sistema.

A única limitação é que as estações de processamento devem ser equipadas com as ferramentas requeridas para processar a peça. Além disso, o FMS é projetado para processar várias configurações de peças simultaneamente, pelo uso de suas estações de processamento de forma concorrente.

Se peças de apenas um tipo são carregadas no sistema, algumas estações de processamento certamente tenderão a ser bastante utilizadas (aquelas requeridas para a peça em particular) enquanto outras serão pouco utilizadas. Isto é desejável para manter uma relação de lançamentos no FMS.

Dentro desse requisito, várias combinações de taxas de produção e volumes podem ser processadas no sistema para reunir demandas especificadas de produtos.

c. Reduzir tempo de comando de produção e incrementar utilização de máquinas

Com um FMS, os tempos de inicialização e de espera são reduzidos, há uma movimentação eficiente de peças, bem como processamento simultâneo, entre outros aspectos. Isso diminui o tempo total de não operação das estações de trabalho.

d. Reduzir inventários em processo

A flutuação de peças no FMS é limitada. De fato, muitas peças carregadas no sistema tendem a obstruir a rápida movimentação de peças no sistema.

e. Reduzir trabalho direto e indireto

Na operação típica de muitas Máquinas NC, utiliza-se um operador por máquina. Na operação em FMS, o trabalho total pode ser realizado por operadores com a função de supervisor, o que reduz o número de operadores necessários à produção.

f. Melhor controle de movimentação

Uma vez que os tempos no FMS são substancialmente reduzidos, as peças não têm como ficarem "perdidas" no percurso. Isto resulta em melhor informação e controle das peças em movimento.

2.2.2. Componentes

Segundo Groover (1987), os componentes de um FMS consistem de três categorias principais:

- Estações de Processamento;
- Sistemas de Movimentação e Armazenagem de Materiais;
- Sistema de Controle por Computador.

Esses componentes são melhores descritos a seguir.

2.2.2.1 Estações de Processamento

Na maioria das aplicações atuais, as estações de processamento são tipicamente Máquinas Ferramenta CNC que realizam operações de usinagem em famílias de peças. Contudo, Sistemas Flexíveis de Manufatura estão sendo projetados com outros tipos de equipamentos de processamento, incluindo estações de inspeção, entre outros.

Máquina Ferramenta CNC é uma máquina que pode executar programas que controlam suas operações (Tronco, 1992). Normalmente necessitam de um operador para colocar peças e ferramentas, porém, uma vez que está executando as operações de usinagem em uma determinada peça, elas requerem menos envolvimento do operador. Ainda, a carga e descarga também podem ser feitas através de um manipulador automático.

De uma maneira geral, as Máquinas Ferramenta devem possuir uma certa parcela de flexibilidade, já que são destinadas a realizar uma grande variedade de operações em uma variedade de geometria de peças (Meredith e Hill, 1987).

As Máquinas Ferramenta usadas em um FMS dependem dos requisitos de processamento a serem executados pelo sistema. Essas necessidades de processamento tendem a dividir os FMSs em dois grupos distintos: FMS dedicado e FMS aleatório. Os dois diferentes grupos resultam em diferentes requisitos de Máquinas Ferramenta.

O **sistema dedicado** é desenvolvido para prover capacitações de aplicações em operações específicas. Nesse caso o FMS pode ser projetado como um sistema dedicado para reunir uma variedade limitada de processamentos requeridos. Máquinas Ferramenta especiais são utilizadas em FMSs dedicados e de alta especialização.

O **FMS aleatório** é desenvolvido para se adaptar a uma grande variedade de peças em seqüências não pré-programadas.

Novos projetos de peças podem ser futuramente introduzidos no sistema. Como consequência, as Máquinas Ferramenta devem possuir uma certa flexibilidade. Centros de usinagem de 4 e 5 eixos devem ser uma escolha típica. Dessa maneira as máquinas são destinadas a realizar uma grande variedade de operações em uma variedade de geometria de peças.

2.2.2.2. Sistema de Movimentação e Armazenamento de Materiais

Vários tipos de equipamentos de manipulação de material automático são usados para transportar peças entre estações de processamento e, algumas vezes, incorporam armazenagem dentro de sua função (Shopbell, 1986).

Esses sistemas de movimentação e armazenagem de materiais movem peças entre estações de processamento, locais de armazenagem e pontos de entrega e, devem satisfazer os seguintes requisitos:

a. Movimento aleatório entre as estações de processamento das peças "palletizadas"

O termo "aleatório" significa que as peças devem ser capazes de fluir de uma estação de trabalho para outra qualquer. "Palletizada" significa que as peças são montadas em "pallets" de fixação. Os "pallets" devem ser capazes de mover-se independentemente um do outro para minimizar interferência e maximizar utilização de estações de processamento. Existem limitações no grau de independência que pode ser alcançado em um dado sistema de movimentação de materiais.

b. Armazenamento temporário

Este armazenamento inclui tanto a carga e descarga manual para a estação de carga/descarga como a carga e descarga automática para as estações de processamento. Uma vez que um FMS pode ter máquinas em ambos os lados do sistema de movimentação, o sistema deve ser capaz de carregar e descarregar em ambos os lados.

c. Compatibilidade com o controle computadorizado

d. Previsão para expansão futura

O sistema de movimentação de materiais deve ser desenvolvido para ser expansível em base modular.

e. Acesso às Máquinas Ferramenta

O sistema de movimentação da peça deve prover acesso desobstruído no nível do chão para as estações de processamento individuais na linha.

g. Operação em ambiente de chão de fábrica

O sistema deve operar corretamente na presença de cavacos de metal, fluidos e poeira.

Os elementos de um sistema de movimentação de materiais podem ser agrupados em: Robôs Industriais, Veículos Auto-Guiados, Transportadores e Armazéns Automatizados (Egbelu e Tanchoco, 1984; Pierson, 1984; Ravindran, e outros, 1988; Egbelu e Roy, 1988).

Um *Robô* é basicamente um manipulador reprogramável, multifuncional, projetado para movimentar materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais através de movimentos programáveis, para executar tarefas variáveis. Os tipos principais de Robôs incluem Manipuladores Mecânicos ("Pega e Coloca", ou "Pick and Place") (figura 2.5) e Robôs Programáveis (figura 2.6).

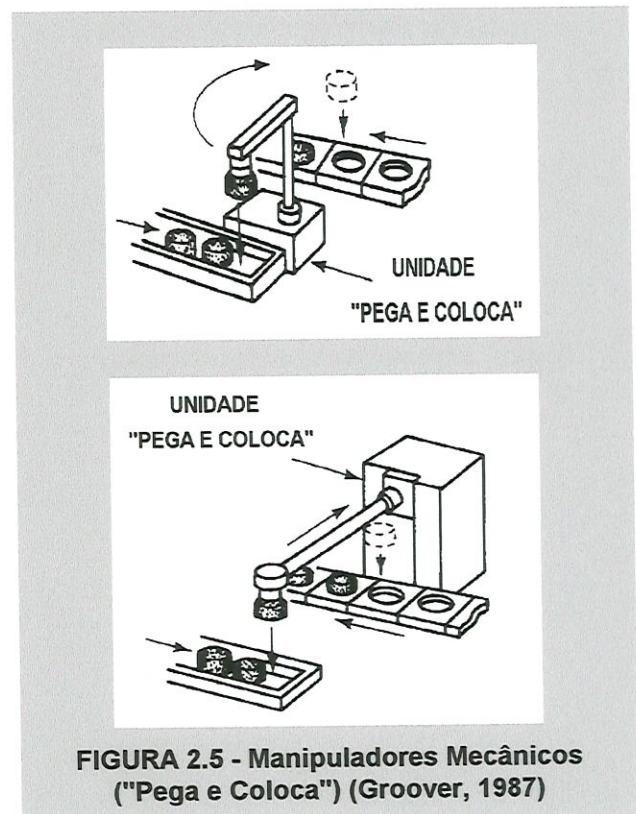


FIGURA 2.5 - Manipuladores Mecânicos ("Pega e Coloca") (Groover, 1987)

Os Robôs Programáveis podem ser agrupados em 1a., 2a. e 3a. geração, de acordo com sua capacidade de programação, realimentação e sensoreamento.

Há diversas aplicações de Robôs em sistemas flexíveis. Os Manipuladores Mecânicos são utilizados em funções específicas nas quais realizam movimentos repetitivos para as seguintes aplicações:

- carga e descarga de máquinas;
- transporte de objetos frágeis;

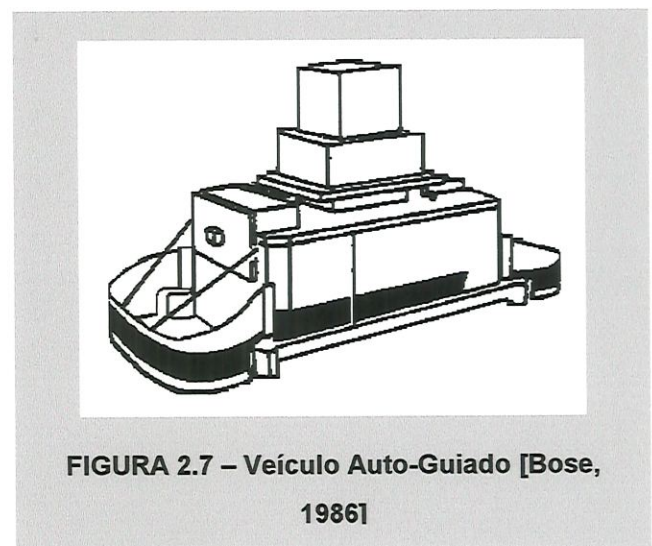
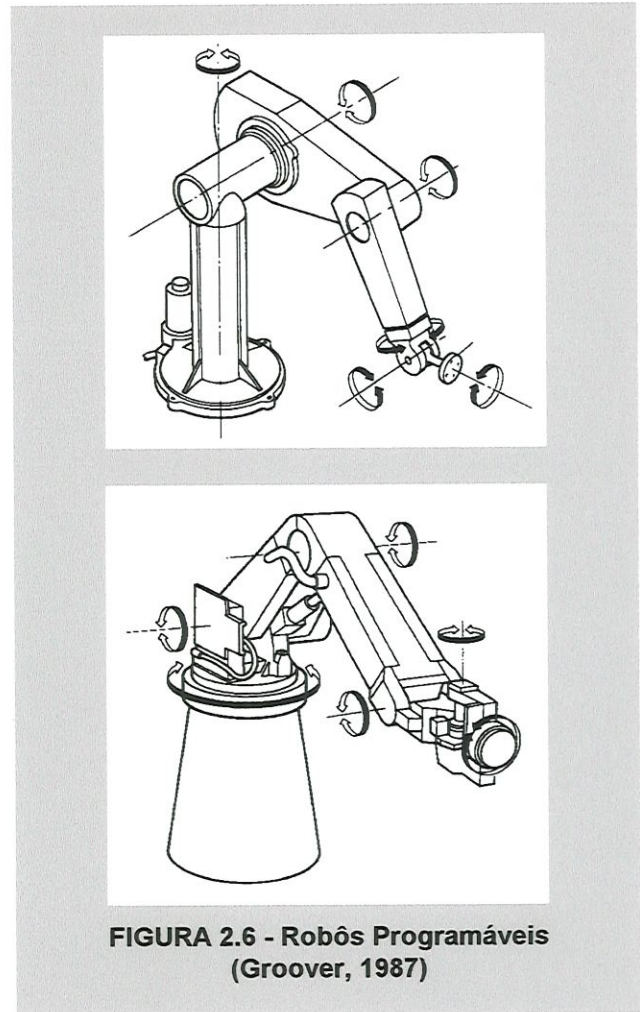
- embalagem e distribuição;
- serviços de almoxarifado.

Já os Robôs Programáveis permitem um controle contínuo de trajetória, ponto a ponto, permitindo posicionamento preciso e repetibilidade. Assim, são utilizados em substituição às operações manuais, tais como:

- furação;
- rebarbação;
- pintura;
- montagem automatizada.

Um outro elemento dos Sistemas de Movimentação de Materiais são os *Veículos Auto-Guiados* (ver figura 2.7). Eles constituem sistemas de transporte pelos quais veículos carregam, transportam e descarregam cargas, controlados por computador próprio, sem operador.

Os AGVs transportam ferramentas e/ou "pallets" de peças desde os armazéns até os locais de trabalho (ou vice-versa) segundo trajetórias que devem ser otimizadas e programadas.



Isto implica, nas versões mais sofisticadas de AGVs, em um certo grau de inteligência embarcada, inclusive com capacidade de se comunicar por Rádio-Frequência (RF) com o Computador Gerenciador do Sistema de Manufatura em que se insere.

Diferente de dispositivos de transporte de material convencionais, como transportadores monotrilho ou esteiras, um AGV pode ser capaz de selecionar sua própria rota ou curso para atingir seu destino.

Ele tem basicamente a mesma liberdade de uma empilhadeira manual, mas não requer um operador. Através de seu computador de bordo, o veículo é hábil para receber informações ou comandos, tais como a identificação da carga, seu destino, e outras instruções especiais, que são fornecidas por um computador externo (Controlador Central) ou, em alguns casos, por entrada manual.

O controle do sistema total e dos carros é feito por computador central, computador de bordo e dispositivos de controle de tráfego. O uso de AGVs proporciona:

- **flexibilidade:** possibilidade de alteração de rotas, com acesso direto às estações de processamento e armazéns automatizados.
- **monitoração em tempo real:** possibilidade de alteração de rotas devido à reprogramação de peças.
- **segurança:** trafegam a uma velocidade média de 20 a 70 m/min; possuem microcomputadores que se comunicam com o computador central para evitar colisões, e sensores para precisão de posicionamento.
- **capacidade de carga:** deve-se considerar tamanho, volume e peso da carga transportada.

O terceiro elemento do Sistema de Movimentação de Materiais são os *Transportadores*, os quais podem ser classificados em vários tipos, cujos principais são os Transportadores de Roletes, Transportadores por Correias, Transportadores com Camada de Ar e Transportadores Modulares (Tronco, 1992).

São utilizados em aplicações em que o dispositivo a ser transportado possui uma rota fixa, na qual a precisão de posicionamento nas operações de coleta e entrega não é um fator determinante.

O Transportador de Roletes (figura 2.8) usa roletes tracionados para deslocar os "pallets" de peças, os quais podem trafegar sujeitos às capacidades (ou necessidades) do sistema de controle. Permite-se aos "pallets" o empilhamento em um segmento do transportador, implementando-se um método de "bufferização", ou seja, pode-se implementar o armazenamento

temporário de "pallets", permitindo que os mesmos sejam estocados e utilizados de acordo com as necessidades e prioridades determinadas pelo Sistema de Manipulação de Materiais.

Há mecanismos que permitem aos "pallets" um roteamento por caminhos alternativos conforme ilustrado na figura 2.9.

O Transportador de Correias é similar ao Transportador de Roletes, porém utiliza correias contínuas tracionadas tipicamente por roldanas, e são usualmente restritos a movimentar os "pallets" em linha reta.

Já Transportadores com Camada de Ar usam fluxo de ar para suportar e movimentar "pallets" numa pista, a qual é usualmente um duto de ar que tem orifícios no topo.

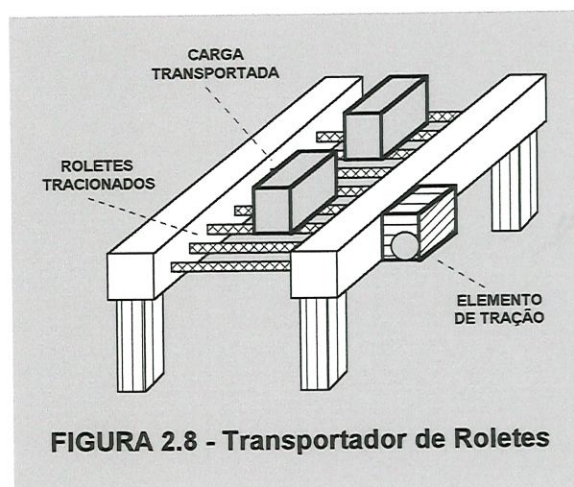


FIGURA 2.8 - Transportador de Roletes

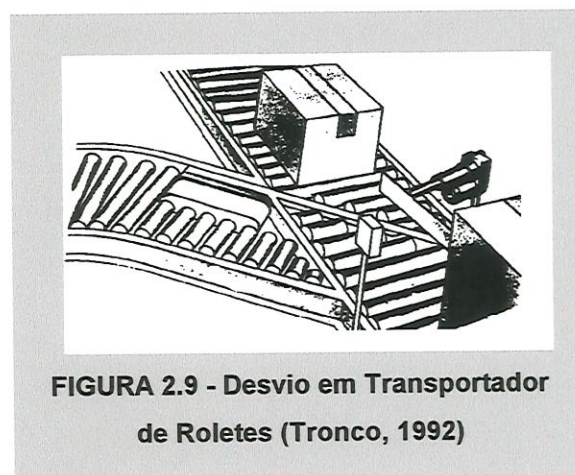


FIGURA 2.9 - Desvio em Transportador de Roletes (Tronco, 1992)

Jatos de ar podem ser usados para desviar os "pallets" para bifurcações na pista, permitindo controle de roteamento. Esse tipo de transportador é normalmente usado para transporte de itens pequenos e frágeis.

O Transportador Modular é composto de pequenos módulos retangulares, assemelhando-se a pequenas seções do transportador por correia. Cada módulo tem um motor, duas correias com movimentos controlados, e sensores de "pallets". Os módulos são colocados um após o outro para que os "pallets" possam trafegar sobre a seqüência estabelecida.

Para interseções, pares adjacentes de módulos são rotacionados para alinhamento, permitindo aos "pallets" formarem ângulo reto. Como os módulos são individualmente controlados, os sistemas transportadores modulares são extremamente versáteis.

O quarto elemento do Sistema de Movimentação de Materiais são os *Armazéns Automatizados e Integrados*. De uma maneira geral, os dispositivos mais utilizados para esse fim incluem (Tronco, 1992):

- Sistemas Automáticos de Armazenamento e Recuperação de Materiais (AS/RS);
- Sistemas AS/RS Mini-Carga;
- Sistemas "Car-in-Lane";
- Carrosséis Horizontais e Verticais.

Sistemas AS/RS (figura 2.10) são basicamente formados por estantes de armazenamento, ao longo das quais move-se uma máquina de carga e descarga automatizada. Essa máquina normalmente é um elevador, no qual é fixado um carro de transferência, que realiza as funções de carga e descarga do "pallet" selecionado.

Os Sistemas AS/RS Mini-Carga são semelhantes aos AS/RS convencionais, com a



FIGURA 2.10 - Sistemas AS/RS
(Tronco, 1992)

diferença que, ao invés de armazenamento de cargas unitárias (por exemplo "pallets"), o sistema armazena caixas (ou recipientes) que contém pequenos itens. Tais itens normalmente são utilizados para montagem de um tipo de produto. O AS/RS Mini-Carga geralmente é utilizado em operações de montagem flexível.

Sistemas "Car-in-Lane" (figura 2.11) são estruturas de armazenamento que conjugam carros de transferência e estantes de armazenamento, sendo que os carros deslocam-se através das travessas das estantes, armazenando e coletando cargas.

Carrosséis (figura 2.12) horizontais e verticais são estruturas giratórias nas quais são presas bandejas de armazenamento. Através do giro de tais estruturas, seleciona-se a bandeja requerida. Tais sistemas são normalmente utilizados em aplicações de montagem flexível.

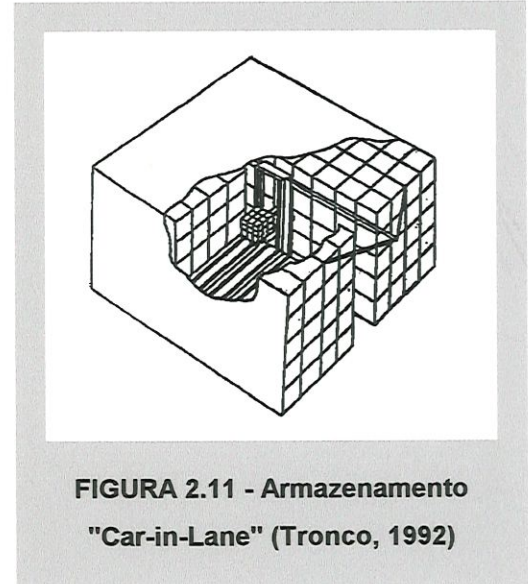


FIGURA 2.11 - Armazenamento "Car-in-Lane" (Tronco, 1992)

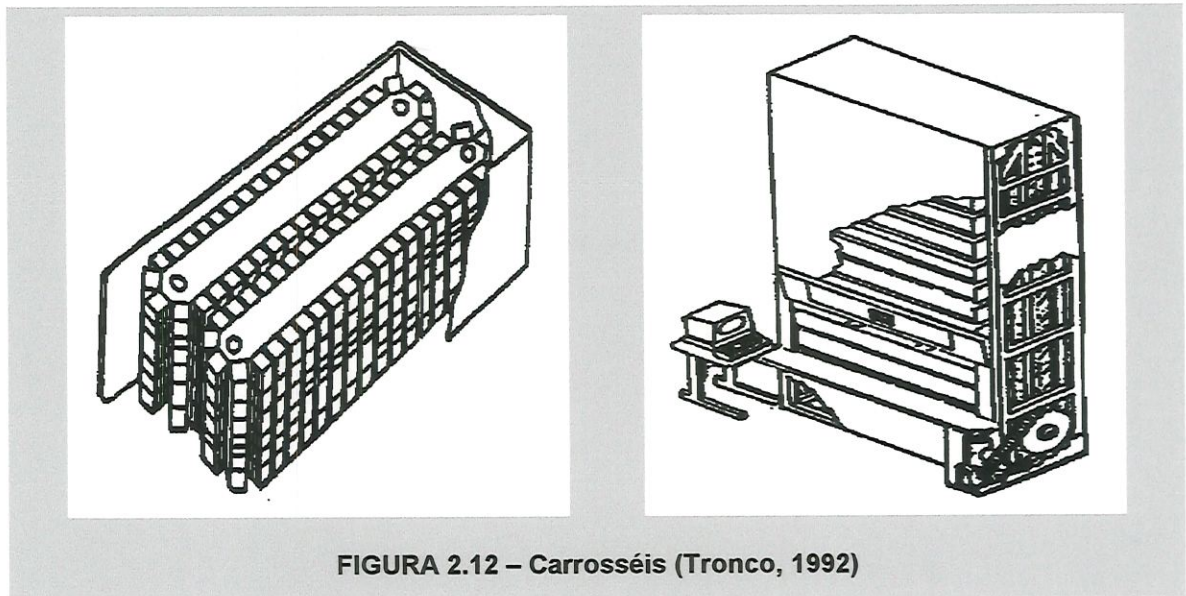


FIGURA 2.12 – Carrosséis (Tronco, 1992)

Todos esses tipos de armazéns automatizados têm objetivos básicos comuns que são:

- controle computacional do material em processo: situação e localização "on line" do material (peças, ferramentas, "pallets") nos subsistemas do FMS;
- redução de inventário;
- aumento de segurança e redução de perdas por danificação e erros de localização;
- eliminação de manuseio repetitivo e gerenciamento de materiais;
- aumento de produtividade.

As dificuldades principais são a possibilidade de falha de uma das partes (elevador, entregador, etc.), o que pode afetar toda a fábrica, e a necessidade de soluções paralelas para operação mecânica;

O sistema de movimentação de peças proporciona duas funções. A primeira é o movimento de peças entre estações de processamento. A segunda função é a integração com os centros de trabalho individuais.

2.2.2.3. Sistema de Controle por Computador

O terceiro componente de um FMS é o Sistema de Controle por Computador. Esse Sistema é usado para coordenar as atividades das estações de processamento e o sistema de movimentação e armazenagem de materiais.

As funções realizadas pelo Sistema de Controle por Computador do FMS, bem como os dados necessários para desenvolver tais funções e os vários tipos de informação, podem ser agrupadas como segue:

a. Armazenamento de programa NC da peça

Os programas de controle numérico para as peças que são usinadas para as várias estações de processamento na linha devem ser armazenados.

b. Distribuição dos programas de peças para as Máquinas Ferramenta individuais.

Essa função deve ser realizada no formato correto para a máquina (pós-processador).

c. Controle de produção.

Essa função inclui decisões sobre troca de partes e frequência de entrada das várias peças no sistema. Essas decisões são baseadas em dados introduzidos no computador.

d. Controle de Tráfego

O termo Controle de Tráfego refere-se à coordenação do sistema primário de transporte de peças que movimenta as peças entre as estações de processamento. Este controle é efetuado dividindo-se o sistema de transporte em duas zonas.

Uma zona é uma seção do sistema primário de transporte a qual é individualmente controlada por um computador. Para permitir somente um "pallet" presente em uma zona, o movimento de cada peça deve ser controlado.

O controle de tráfego opera as chaves e interruptores para as ramificações e pontos de encontro das peças para pontos de carga de Máquinas Ferramenta e fornece peças para as estações de carga e descarga.

e. Controle "Shuttle"

Está relacionado com o gerenciamento da parte secundária do sistema de movimentação para cada Máquina Ferramenta, ou seja, está relacionado com os dispositivos de carga e descarga de cada máquina. Cada sistema "shuttle" deve ser coordenado com o sistema primário de movimentação, e esse deve ser também sincronizado com as operações de cada Máquina Ferramenta a qual serve.

f. Monitoração do sistema de movimentação

O computador deve monitorar o "estado" de cada "pallet" nos sistemas primário e secundário de movimentação assim como o "estado" de cada peça existente no sistema.

g. Controle de ferramenta

Monitoração e controle de ferramenta de corte é uma importante função do sistema computadorizado do FMS. Há dois aspectos no controle de ferramenta: localização de ferramenta e monitoração de tempo de vida útil.

h. Monitoração e informação de desempenho/eficiência do sistema.

Essa função está relacionada à avaliação do desempenho do sistema com relação a parâmetros pré-determinados, os quais são utilizados como realimentação para o controle.

Vários caminhos para controlar os vários níveis na operação de manufatura têm sido discutidos usando a estrutura geral de CAM e CIM; sistemas tempo-real com capacidade de coleta interativa de informações, modelagem matemática e simulação, proporcionam maior facilidade de implementação. Um grande sistema deve ser dividido em vários subsistemas que são controlados independentemente (Obed e Obed, 1986).

2.3. OUTRAS ARQUITETURAS

Dentre os cenários de fabricação encontrados, um dos que tem tido maior interesse, pelas indústrias e também em centros de pesquisa, é o de Sistemas flexíveis de Manufatura, devido às suas características colocadas anteriormente.

Entretanto, existem pelo menos outros dois cenários, normalmente encontrados na indústria e na literatura, que são o "Job Shop" e o "Flow Shop" (Desrochers e Al-Jaar, 1997).

No “Job Shop” (figura 2.13), peças diferentes seguem caminhos diferentes através das máquinas. Não há um padrão comum para o fluxo de trabalho através da fábrica. A flexibilidade do “Job Shop” permite fabricar uma grande variedade de ordens de produção de pequeno volume. A desvantagem é o longo tempo de permanência na fabricação e como consequência, um grande inventário.

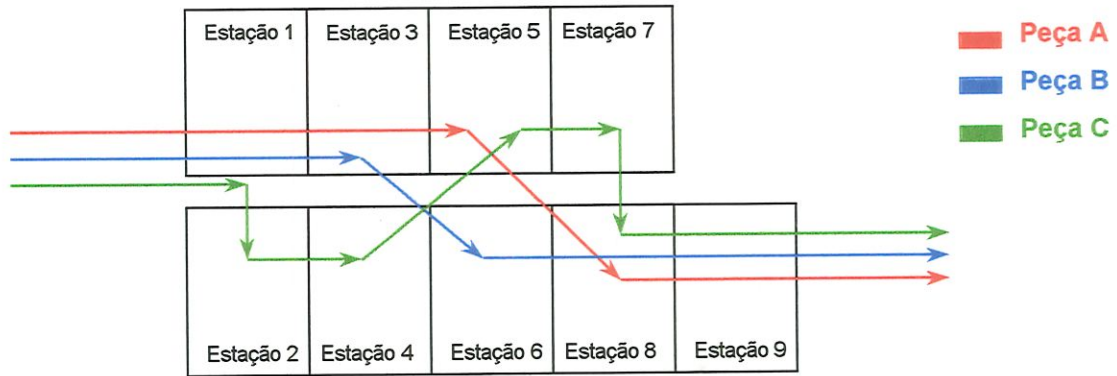


FIGURA 2.13 - “Job Shop” (Desrochers e Al-Jaar, 1997)

No “Flow Shop” (figura 2.14), os trabalhos seguem a mesma seqüência de operações. Os volumes de produção são tipicamente altos e o sistema é bastante eficiente. Versões altamente automatizadas dos “Flow Shops” resultam em linhas de transferência. O problema com esse sistema de produção reside no fato de que, caso haja necessidade de fabricação de um tipo diferente de produto, haverá um grande trabalho para adequação do sistema.

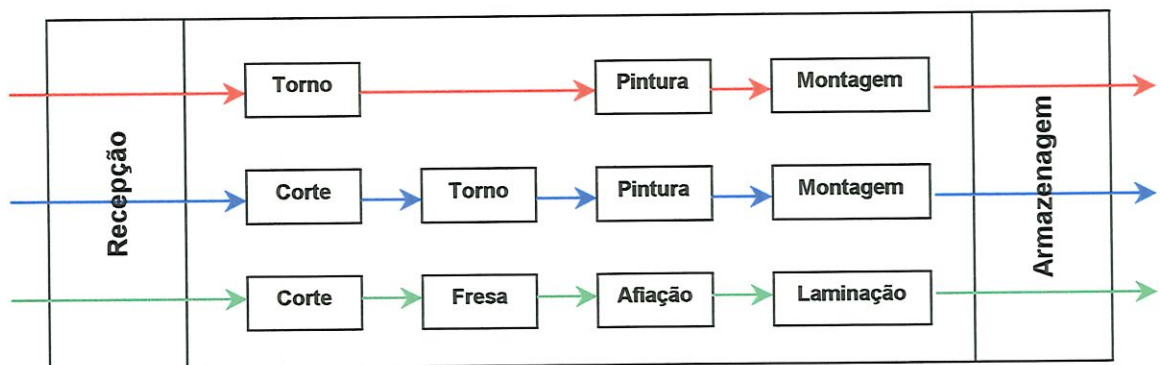


FIGURA 2.14 - “Flow Shop” (Desrochers e Al-Jaar, 1997)

As diferentes formas de apresentação do “chão de fábrica”, aqui chamadas de arquiteturas, mostram formas de trabalho diferenciadas. Entretanto, seus elementos componentes permanecem os mesmos.

Como esse trabalho deverá focar o processo de fabricação, todas essas arquiteturas poderão utilizar a metodologia para modelagem do sistema, e que será melhor discutida no capítulo 5.

2.4. PLANO DE PROCESSO FLEXÍVEL

O plano de processo define as etapas de transformação da peça ou produto, e fornece como resultado, um conjunto de operações a serem realizadas e a seqüência de utilização de recursos, para obtenção do produto final.

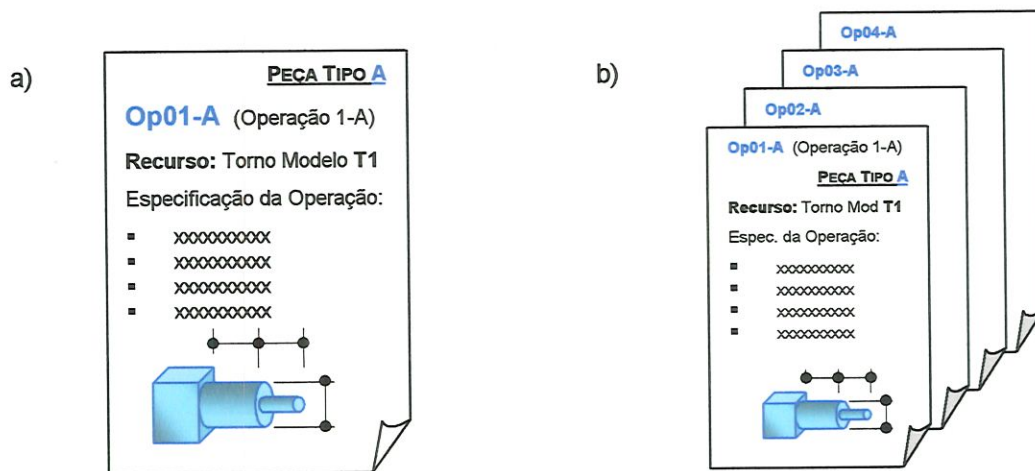


Figura 2.15 - Folhas de processo de fabricação: a) ilustração simplificada de uma folha de processo; b) ilustração simplificada de um plano de processo

Na figura 2.15 ilustra-se a idéia de obtenção de um plano de processo, a partir da elaboração de operações que devem ser efetuadas em uma peça. Na parte a da figura

mostra-se, de uma maneira simplificada, uma folha de processo que descreve a operação **Op01-A** da peça tipo **A**; na parte *b* da mesma figura mostra-se um conjunto de folhas que descreve o processo de fabricação, que transforma a peça tipo **A** em um produto acabado.

No plano de processo estão descritos portanto, todas as estações de transformação necessárias a transformação da peça ou produto, desde a entrada da “peça bruta” até a obtenção do produto final ou peça acabada e seu armazenamento.

Num Sistema Flexível de Manufatura, a utilização de recursos pode ser compartilhada para produção de vários tipos de peças. Além disso, tipicamente existe mais de um recurso onde uma determinada operação de transformação pode ser efetuada.

Isso significa que se uma peça precisa passar por uma operação de transformação, essa transformação pode ser efetuada em qualquer um dos recursos disponíveis e capazes para efetuá-la.

Havendo então mais do que um recurso de mesmo tipo dentro de um ambiente, o processo de fabricação não define, por exemplo, se para uma determinada operação, deve ser utilizada a máquina 1 ou a máquina 2 (ambas de mesmo tipo).

Nesse ambiente, esse plano de processo pode ser considerado como plano de processo alternativo, e assim será considerado nesse trabalho.

Como exemplo, pode-se utilizar a figura 2.26 que mostra uma planta simplificada de um chão de fábrica, com seis recursos.

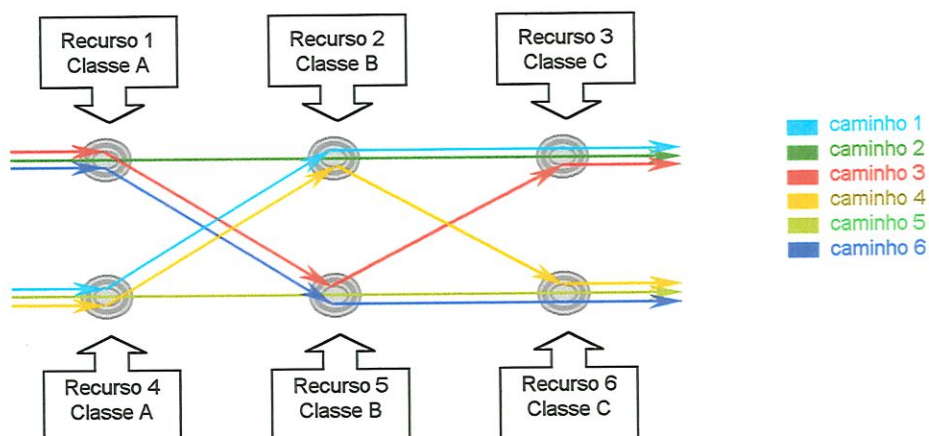


Figura 2.16 - Caminhos alternativos para execução de plano de processo

Na figura anterior, supondo-se que para a transformação de uma peça em produto, as operações do plano de processos definam uma seqüência, que passa inicialmente por um recurso classe A, depois por um recurso classe B e finalmente por um classe C.

No chão de fábrica do exemplo, existem dois recursos de cada classe. Isso significa que cada uma das operações pode ser executada em um dentre dois recursos. Portanto existem diferentes “caminhos” para se atingir o objetivo.

Alguns dos possíveis “caminhos”, que cumprem o plano de processo, estão ilustrados na figura anterior.

No caso de alternativas, como as anteriormente expostas, a escolha pelo recurso disponível deve ser realizada pelo sistema de controle do FMS e deve levar em consideração algumas regras para tal decisão. Entretanto esse sistema de controle e suas regras não serão tratados nesse trabalho.

BREVE HISTÓRICO E DEFINIÇÃO DE REDES DE PETRI

Rede de Petri (PN) é uma técnica de modelagem matemática e gráfica, e tem sido extensamente utilizada para sistemas dinâmicos a eventos discretos (Desrochers e Al-Jaar, 1997; Moore e Gupta, 1996; Zurawski e Zhou, 1994; D'Souza e Khator, 1993). O conceito de Rede de Petri teve sua origem em 1962 com a dissertação de Carl Adam Petri e, desde então várias extensões de PN têm melhorado sua aplicabilidade para vários tipos de sistemas dinâmicos a eventos discretos. Isso é devido à generalidade inerente de PN.

3.1. DEFINIÇÃO DE REDE DE PETRI

Uma PN tem dois elementos que representam o estado (lugar) e o evento (transição) (Murata, 1989). O estado é alterado pelo evento, então utiliza-se um terceiro elemento (arco) que representa o fluxo entre estados e eventos. Um quarto elemento (marca) é também usado junto com o elemento lugar para representar a existência ou não de um estado; e uma notação W junto ao arco, indicativa de peso, mostra o número de marcas que um evento necessita para ocorrer.

Uma definição formal de PN Lugar/Transição é fornecida na tabela a seguir:

Rede de Petri é uma quintupla, $PN = (P, T, F, W, M_0)$ onde	
$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$	é um conjunto de lugares
$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$	é um conjunto de transições
$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$	é um conjunto de arcos
$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$	é o peso das funções (arcos)
$M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$	é a marcação inicial dos lugares
$P \cap T = \emptyset$ e $P \cup T \neq \emptyset$	

Marcas representam o estado do lugar. Transições retiram marcas de todos os lugares conectados a sua entrada por arcos e coloca outras marcas em todos os lugares conectados por arcos a sua saída.

A simulação de um sistema modelado por PN pode ser feita como um jogo de alocação de marcas.

As figuras 3.1 e 3.2 mostram esse jogo. O sistema ilustra a operação de usinagem que precisa dois conjuntos de ferramentas para fabricar uma peça.

Na figura 3.1 um modelo do estado inicial é apresentado. A transição t_1 representa a preparação da primeira operação. Na figura, a abstração usada (Lugar \rightarrow estado, transição \rightarrow evento) pode ser verificada. t_1 está habilitada para “disparar” se a pré-condição p_1 , p_4 e p_8 tem marcas (i.e. tem peça no ” buffer” e ferramentas disponíveis). A marcação inicial é um vetor de número de marcas representado, no caso, por $M_0 = (3, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0)$ (i.e. $M(p_1)=3$, $M(p_2)=0$, $M(p_3)=0$, $M(p_4)=1$, $M(p_5)=0$, $M(p_6)=0$, $M(p_7)=1$, $M(p_8)=1$, $M(p_9)=0$).

Disparando t_1 , marcas de p_1 , p_4 e p_8 são retiradas e introduzidas no lugar de saída p_2 . A subsequente marcação é ilustrada na figura 3.2, ou $M_0 [t_1 > M_1 = (2, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)$. A quantidade de marcas removidas (ou introduzidas) são definidas pelos pesos dos arcos. Na figura 3.1, o peso dos arcos são iguais a 1 (por definição, peso 1 não é expresso).

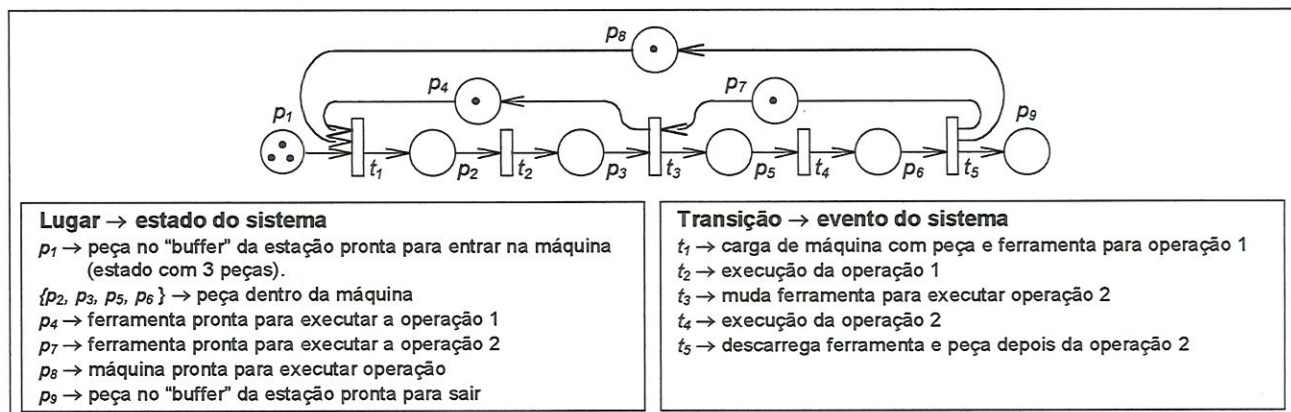


FIGURA 3.1 - Modelo de operação de máquina com troca de ferramentas usando Rede de Petri Lugar/Transição.

A seqüência de disparos sucessivos pode mapear todos os estados alcançáveis do sistema. Alguns métodos de análise formal são disponíveis, incluindo a definição de várias propriedades matemáticas do modelo tais como alcançabilidade, conflito e outros (Murata, 1989).

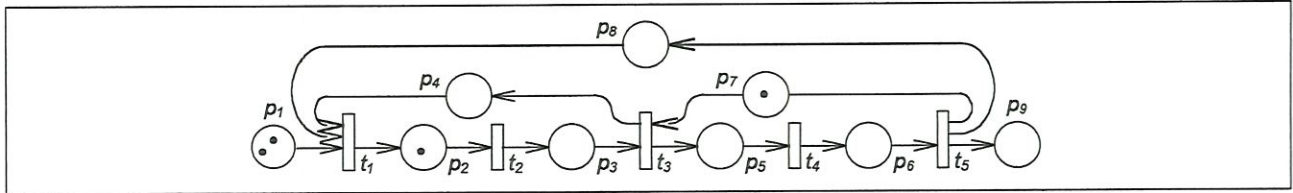


FIGURA 3.2 - Modelo da figura 3.1 depois do disparo de t_1 .

Além dos métodos formais, a simulação pode apresentar informações muito úteis e interessantes tal como o estado individual de cada lugar. Durante a seqüência de disparo $\sigma = t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$, por exemplo, pode-se observar quais os instantes que p_4 perdeu marcas, isto é, o momento em que a ferramenta da operação 1 não estava disponível.

Um outro exemplo pode ser avaliado observando-se a figura 3.3, que mostra um plano de processo alternativo. Se a primeira máquina está processando peça ou em manutenção, uma segunda está habilitada ao trabalho. Para simplificar a figura, o lugar p_{12} representa dois estados ao mesmo tempo, ou seja o estado da máquina e o estado das ferramentas. Esse exemplo mostra a possibilidade de introduzir novas atividades, representar atividades paralelas e o poder de abstração.

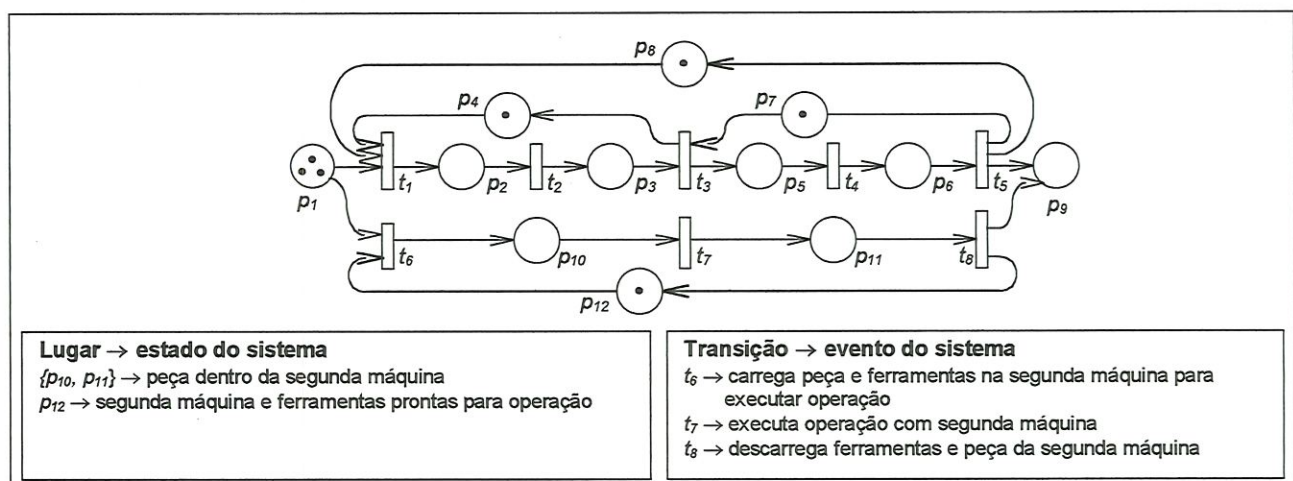


FIGURA 3.3 - Modelo da figura 3.1 com plano de processo alternativo usando uma segunda máquina.

Entretanto, para sistemas complexos, PN tende a se tornar muito grande para análise. Para Sistemas Automatizados de Manufatura, PN é aplicada com sucesso para partes do sistema tais como, Sistemas de Transporte por AGVs (estudo de prevenção de colisão e conflito), intertravamento de máquinas, identificação de conflito no fluxo de peças, sistema de gerenciamento de buffer, plano de processo alternativo e outros, auxiliando na busca por soluções de projeto e controle de tais subsistemas. A busca para união de forma “convencional” desses subsistemas traz uma profusão de elementos gráficos e nomes tornando sua interpretação muito difícil e complexa.

Algumas regras tais como regras de redução, ilustradas na figura 3.4 aumentam a abstração mas não são aplicáveis a todos os casos.

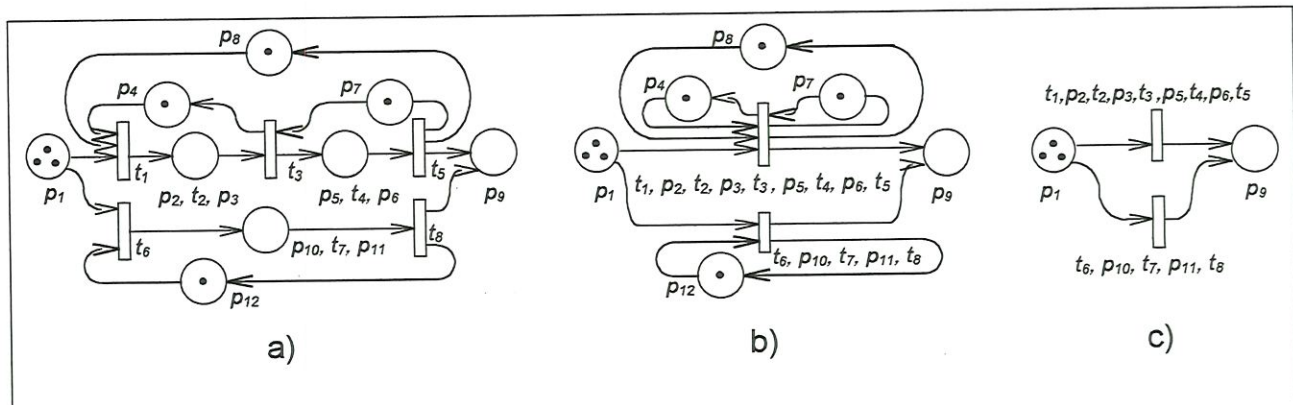


FIGURA 3.4 - Modelo da figura 3.3 com sucessivas aplicações de regras de redução. A primeira redução é a fusão de transições e lugares em série (a). A segunda é outra fusão de transições em série (b). A terceira usa eliminação de “self-loop” (c).

3.2. ALGUMAS EXTENSÕES

Para minimizar os problemas citados anteriormente, muitas extensões de PN têm sido propostas e podem ser divididas em dois grupos (Moore e Gupta, 1996). O primeiro

grupo introduz novos atributos que aumentam seu poder de abstração, tais como PN Estocástica, PN Orientada a Objeto e PN com Lógica Nebulosa. Um outro grupo aumenta a facilidade para projeto de sistemas tais como, Marked Flow Graph (MFG), “Sequential Function Chart” (SFC), PN Colorida, PN Hierárquica, PN Modular e outras. O MFG e p SFC são extensões que usam algumas representações gráficas diferentes para aumentar a facilidade na representação de sistemas de automação. Uma outra extensão, a PN Colorida, permite a identificação das marcas.

A figura 3.5 mostra uma representação gráfica de marcas (cores) nos lugares e “pesos” (expressões) dos arcos. Marcas recebem identificadores e “atravessam” arcos obedecendo determinadas expressões. Na figura, as funções estabelecidas nos arcos são: $\langle x, y \rangle + \langle x, z \rangle$ e ϕ (como condição de entrada da transição) e $\langle y, z \rangle$ e $\langle x \rangle$ (como saída da transição). Ou seja, para disparo da transição, deve-se observar a existência de marcas nos lugares de entrada sendo, para a primeira função, duas combinações de marcas: a, b e a, c . Para a segunda função, não há necessidade de identificação de marca. Após o disparo, as marcas geradas nos lugares de saída, observando as funções, são: a combinação b, c num lugar e a marca a no outro.



FIGURA 3.5 - Marcas e expressões em PN Colorida.

No exemplo da figura 3.1, utilizando a PN Colorida, é suficiente adicionar marcas identificadas, como mostra a figura 3.6. A expressão $\langle x \rangle$ indica que uma marca “a”, “b” ou “c” pode “atravessar” o arco.

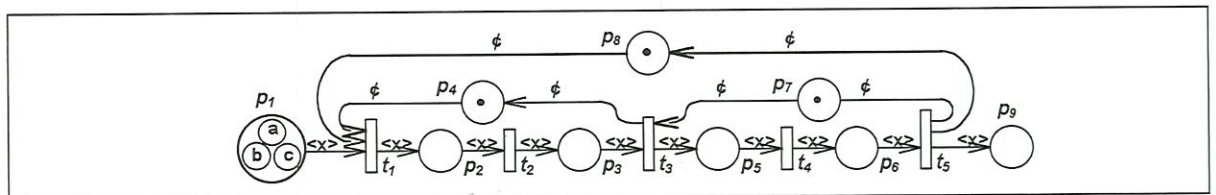


FIGURA 3.6 - Modelo de operação de máquina com troca de ferramentas utilizando PN Colorida.

Um sistema complexo pode ser modelado por marcas individualizadas e pode gerar um modelo pequeno. Entretanto um modelo compacto, como pode ser observado não é sinônimo de modelo simples ou fácil de analisar.

Uma outra extensão que introduz simplificação e resulta em modelos compactos é a PN Modular, onde um grande modelo pode ser subdividido em vários sub-modelos, ou módulos. A estratégia é criar elementos globais (lugares e transições) dentro dos módulos. Os elementos globais têm “visibilidade” em mais que um módulo. Assim, marcas fluem de um módulo para outro. Essa abordagem permite focalizar apenas alguns estados interessantes em um dado momento para um estudo particular antes da avaliação completa.

Considere a figura 3.1. O lugar p_8 representa a posição de uma peça na máquina. Uma das pré-condições da transição t_1 é a disponibilidade da máquina. Assim, o lugar p_8 está cheio de peças. A mesma condição pode estar presente nos lugares p_4 e p_7 . Considerando tais condições, a PN Modular pode ser dividida em três módulos mostrados na figura 3.7. Os lugares p_8 , p_4 e p_7 contém marcas que são somadas quando colocados juntos.

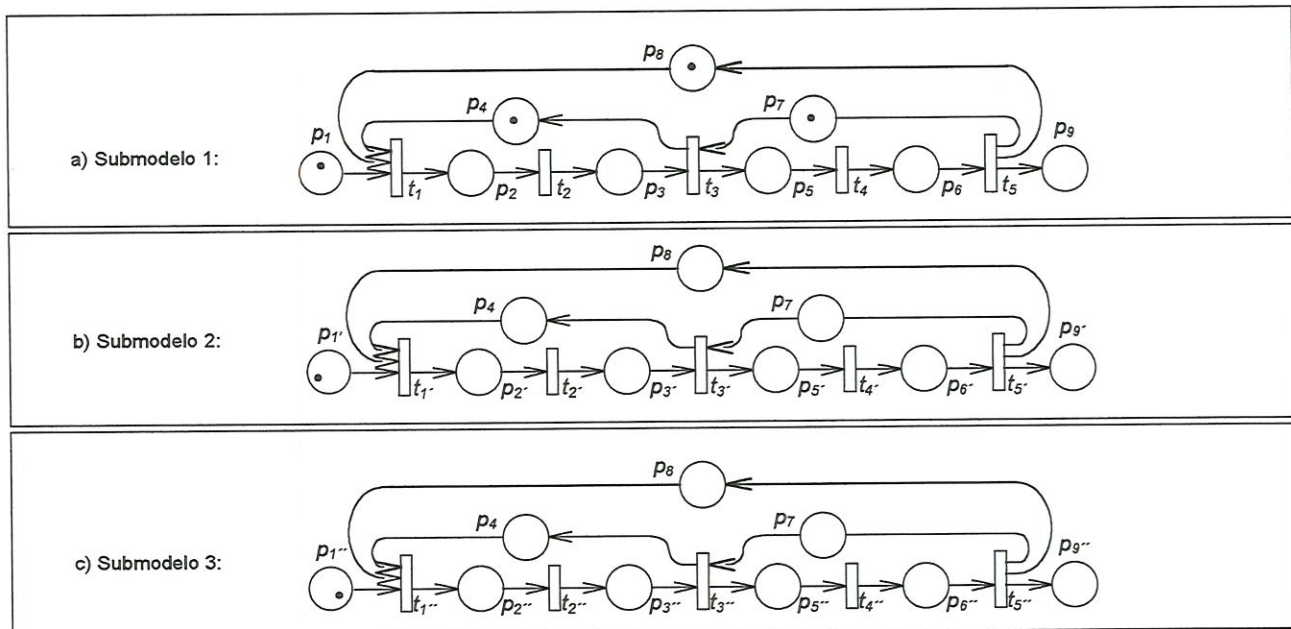


FIGURA 3.7 - Modelo da figura 3.1 subdividido em três sub-modelos, adicionado a possibilidade de identificar a peça.

A PN Modular é uma estratégia de divisão em vários modelos pequenos, contudo, para utilizar métodos de análise para o sistema como um todo é necessário a montagem de cada módulo em um modelo completo. A estratégia necessita precaução para não projetar módulos desconectados do sistema com risco de não representar relações importantes.

Para evitar esses riscos, o uso de uma ferramenta de auxílio ao projeto, como por exemplo um software de edição e simulação, pode ser de grande ajuda.

A abordagem modular tem tido grande interesse por permitir a reutilização de módulos na construção de novos modelos de sistemas.

Em Sistemas Automatizados de Manufatura há uma facilidade de visualização de relação entre elementos como objetos dentro de categorias e com características agrupadas. Isso aponta para a construção de módulos de sistemas considerando os elementos componentes.

3.3. PROPRIEDADES

Uma vez tendo um sistema em PN, uma análise seguindo diferentes métodos poderá ser realizada afim de se obter características do sistema, através da observação das propriedades da rede (Cardoso e Valette, 1997; Murata, 1989; Peterson, 1981).

3.3.1. Propriedades Comportamentais

Algumas propriedades de PN dependem da marcação inicial, ou seja, leva em consideração o estado da rede no momento inicial. Tais propriedades são chamadas “Propriedades Comportamentais”, e levam em consideração o comportamento dinâmico da rede.

- **Alcançabilidade**

Uma marcação Mn é alcançável a partir de uma marcação inicial $M0$ se existe uma seqüência de disparos que transforma $M0$ em Mn . Uma seqüência de disparos é denotada por $\sigma = M0 \ t1 \ M1 \ t2 \ M2 \ . \ . \ . \ tn \ Mn$, ou simplesmente $\sigma = t1 \ t2 \ . \ . \ . \ tn$.

▪ Limitação

Uma Rede de Petri $(N, M0)$ é k -limitada ou simplesmente limitada se o número de marcas em cada lugar não excede um número finito k , para qualquer marcação alcançável a partir de $M0$, isto é, $M(p) \leq k$ para qualquer lugar P e qualquer marcação $M \in R(M0)$.

A Rede de Petri é segura se ela é limitada a um (1-limitada).

▪ Vida

O conceito de vida está relacionado à ausência de conflito no modelo. Uma rede é considerada viva (ou da mesma maneira, $M0$ é uma marcação viva para N), se para qualquer marcação atingida a partir de $M0$, há pelo menos uma transição habilitada, podendo originar uma nova marcação. Isso garante que a rede não tem conflito.

O conceito de vida também pode ser estendido para uma transição t em um Rede de Petri $(N, M0)$, atribuindo diferentes níveis de vida para a transição, como:

- 0) “*dead*” (ou *morta*) se t nunca será disparada, para qualquer seqüência de disparo a partir de $M0$;
- 1) *L1-viva* (potencialmente disparável) se existe pelo menos uma seqüência de que dispara t , a partir de $M0$;
- 2) *L2-viva* se, dado um número inteiro k , t pode ser disparada pelo menos k vezes em alguma seqüência de disparo a partir de $M0$;
- 3) *L3-viva* se t aparece infinitamente, ou muitas vezes em alguma seqüência de disparo a partir de $M0$;
- 4) *L4-viva* ou viva se t é *L1-viva* para toda marcação M em $R(M0)$.

▪ Reversibilidade

Uma Rede de Petri $(N, M0)$ é reversível se, para cada marcação M em $R(M0)$, $M0$ é alcançável a partir de M . Então, em uma rede reversível, pode-se sempre voltar à marcação inicial.

- **Cobertura**

Uma marcação M em uma rede $(N, M0)$ pode ser coberta se existe uma marcação M' em $R(M0)$ tal que $M'(p) \geq M(p)$ para cada P na rede.

- **Persistência**

Uma rede é persistente se, para quaisquer duas transições habilitadas, o disparo de uma não desabilita a outra. Uma transição em uma rede persistente, uma vez habilitada, somente será desabilitada se for disparada.

3.1.2. Propriedades Estruturais

As propriedades estruturais de uma Rede de Petri são independentes da marcação inicial e portanto, são determinadas pela estrutura topológica da rede e segue algumas definições (Desrochers e Al-Jaar, 1997; Moore e Gupta, 1996; Murata, 1989):

- Uma PN é estruturalmente limitada se é limitada para qualquer marcação inicial;
- Uma PN é estruturalmente viva se é viva para qualquer marcação inicial;
- Uma PN é conservativa se, para qualquer marcação inicial $M0$ e uma marcação $M \in R(M0)$, existe um vetor X ($n \times 1$) tal que:

$$Xi \neq 0, \text{ para qualquer } i = 1, \dots, n, \text{ e } X^T M = X^T M0$$

- Uma PN é estruturalmente consistente se há uma marcação M e uma seqüência de disparo Sc , chamada seqüência de disparo cíclica, e um vetor de disparo V , tal que:
 - Sc causa um retorno da rede para M ;
 - V não tem elementos nulos, isto é, Sc dispara cada transição pelo menos uma vez.
- Uma PN é parcialmente consistente se o vetor de disparo V tem alguns elementos nulos (algumas transições não irão disparar).

- Uma PN é completamente controlável se qualquer marcação é alcançável a partir de qualquer marcação inicial.
- Uma PN é repetitiva se existe uma marcação finita M_0 e uma seqüência de disparo S , tal que os elementos do vetor de disparo associado V são infinitos. Se V contém somente algumas das transições, a rede é parcialmente repetitiva.

3.4. MÉTODOS DE ANÁLISE

Os métodos de análise de Redes de Petri podem ser classificados em três grupos (Cardoso e Valette, 1997; Murata, 1989): o método da árvore de cobertura (ou de alcançabilidade), a abordagem de equações de estado e técnicas de decomposição ou redução.

O primeiro método envolve essencialmente a enumeração de todas as marcações alcançáveis ou suas marcações de cobertura. Seria possível aplicar esse método a todas as classes de PN, mas limita-se o uso a pequenas redes devido à explosão do espaço de estados. Por um outro lado, as equações matriciais e técnicas de redução são poderosas, mas em muitos casos elas somente são aplicáveis a sub-classes especiais de PN ou em situações especiais.

3.4.1. Árvore de Cobertura

Dada uma PN (N, M_0) com uma marcação inicial M_0 , busca-se por todas as possíveis novas marcações através do disparo das transições habilitadas, uma por vez. Através de um processo de busca, obtém-se como resultado um grafo representando todas as marcações possíveis. O algoritmo de construção da árvore de alcançabilidade é apresentado por Murata (1989).

3.4.2. Matriz de Incidência e Equação de Estado

O comportamento dinâmico de muitos sistemas estudados em engenharia pode ser descrito por equações diferenciais ou equações algébricas. De uma forma similar, é possível representar sistemas de eventos discretos por equações matriciais que descrevem o comportamento dinâmico de tais sistemas modelados por Rede de Petri (Murata, 1989).

Contudo, a solução dessas equações é algumas vezes limitada, parcialmente pela natureza determinística em modelos de PNs e por causa também de restrições que soluções devem encontrar inteiros não negativos.

Matriz de Incidência

Para uma PN com n transições e m lugares, a matriz de incidência $A = [a_{ij}]$ é uma matriz $n \times m$, de inteiros e sua entrada típica é dada por $a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-$, onde $a_{ij}^+ = w(i,j)$ é o peso do arco da transição i para seu lugar de saída j e $a_{ij}^- = w(i,j)$ é o peso do arco para a transição i de seu lugar de entrada j .

Equação de Estado

A equação de estado, que mostra o comportamento dinâmico do sistema, ou seja, a nova marcação M_k , a partir da marcação M_{k-1} , após um determinado disparo, é dada por:

$$M_k = M_{k-1} + A^T u_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

onde:

M_k : é um vetor $m \times 1$, onde o elemento j ($j = 1, \dots, m$) denota o número de marcas no lugar j imediatamente antes do disparo de número k ;

u_k : é o k -ésimo vetor ($n \times 1$) de controle ou de disparo com $n-1$ elementos nulos e um elemento não nulo. Um valor 1 na i -ésima posição indica que a transição i dispara no k -ésimo disparo.

A^T : é a transposta da matriz de incidência anteriormente definida.

3.4.3. Técnicas de Decomposição e Redução

Para facilitar as análises de sistemas grandes, pode-se reduzir o modelo do sistema, preservando suas propriedades originais. De uma maneira reversa, pode-se usar técnicas que transformam um modelo abstrato em um modelo mais refinado de uma forma hierárquica.

Há muitas técnicas de transformação de Redes de Petri que trabalham nesse sentido e pode ser encontrada na literatura. Dentre elas pode-se ilustrar algumas de transformação simples (Murata, 1989), que preservam as propriedades de vida, segurança e limitação, e que são:

- fusão de lugares em série (Figura 3.8-a);
- fusão de transições em série (Figura 3.8-b);
- fusão de lugares em paralelo (Figura 3.8-c);
- fusão de transições em paralelo (Figura 3.8-d);
- eliminação de lugares com “auto-loop” (Figura 3.8-e);
- eliminação de transições com “auto-loop” (Figura 3.8-f).

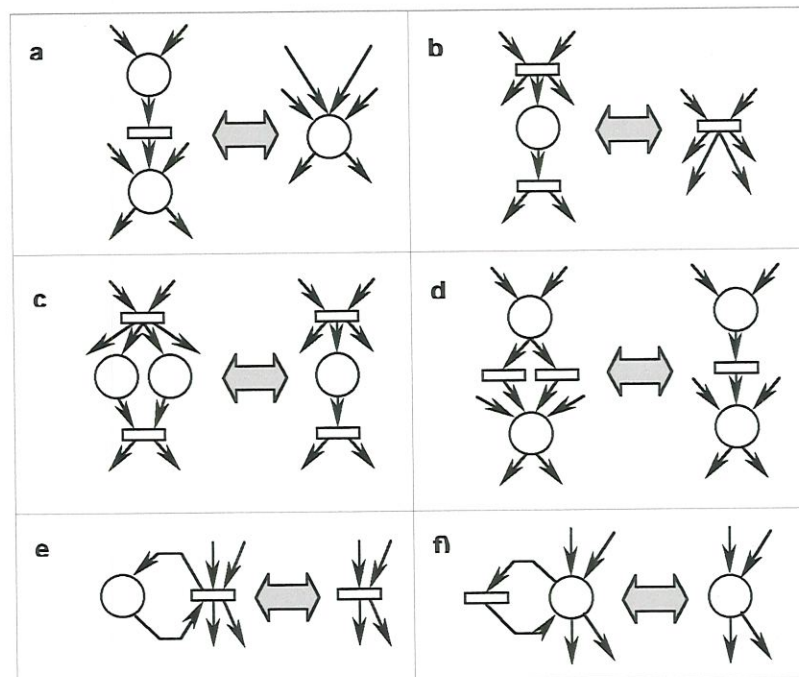


FIGURA 3.8 - Exemplos de transformações de PN (Murata, 1989)

**APLICAÇÕES DE REDES DE PETRI PARA
MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE
MANUFATURA**

Existem quatro abordagens que podem ser usadas para classificar modelos de PN em manufatura (Moore e Gupta, 1996):

- o tipo de sistema de manufatura modelado;
- os elementos do sistema de manufatura representados no modelo;
- o tipo de PN usado para representar o sistema;
- o tipo de análise realizado com o modelo.

Um caminho para classificação de modelos de PN aplicados a manufatura leva em consideração, portanto, o tipo de sistema modelado, que pode ser:

- “flow shop”;
- “job shop”;
- sistemas flexíveis de manufatura;
- linhas de transferência;
- etc.

Todos podem ser caracterizados pelo seu escopo (a diversidade dos trabalhos que realizam) e pela sua escala (o volume total de trabalhos) (Buzacott e Shanthikumar, 1993, apud Moore e Gupta, 1996).

Modelos de PN para manufatura também podem ser caracterizados pelos tipos e números de elementos representados no modelo. Moore e Gupta (1996) identificaram seis categorias de elementos de manufatura:

- estações de trabalho;
- sistemas de manuseio de materiais;
- tarefas;
- armazenagem;
- outros recursos;
- outras restrições.

Modelos de PN para manufatura também podem ser caracterizados pelo tipo de PN utilizada para desenvolver o modelo:

- PNs Clássicas;
- PNs Temporizadas
- PNs Estocásticas;
- PN de Alto-Nível ou Coloridas;
- etc.

Devido a limitações no poder de modelagem, somente poucos modelos de PN Clássicas foram desenvolvidos para sistemas de manufatura. O foco desses modelos é o comportamento lógico do sistema e a principal aplicação é o desenvolvimento de sistemas de controle que são livres de conflito e “limitados” (características avaliadas na análise de desempenho da PN).

As PN Temporizadas, Estocásticas e suas variantes que consideram a informação de tempo, têm sido aplicadas a uma grande variedade de problemas de manufatura. As maiores aplicações incluem análise de desempenho e desenvolvimento de sistemas de controle “limitados” e livres de conflito.

PN Coloridas também têm sido aplicadas a uma grande variedade de problemas de manufatura, onde os focos principais são a especificação de projeto de sistemas e a análise de desempenho.

Finalmente, pode-se caracterizar modelos de PN aplicados à manufatura de acordo com o foco de sua análise. Nesse aspecto há duas categorias:

- análise estrutural ou qualitativa;
- análise quantitativa.

A análise qualitativa refere-se às propriedades comportamentais de modelos “não temporizados”, isto é:

- alcançabilidade;
- limitação;
- vida;
- reversibilidade;
- cobertura.

As medidas qualitativas são usadas para avaliar o comportamento do sistema em função da ocorrência ou não ocorrência de alguns eventos. Em geral, o interesse está em assegurar que determinados eventos não ocorram, particularmente aqueles que paralisariam o sistema ou violariam algumas restrições.

As medidas quantitativas são usadas para avaliar o desempenho do sistema ao longo do tempo. Algumas medidas quantitativas de desempenho para sistemas de manufatura são:

- tempo de processamento;
- “work-in-process” (WIP);
- utilização de máquinas;
- utilização de veículos;
- capacidade de processamento.

Em geral, as empresas de manufatura desejam minimizar o tempo de processamento e o WIP, e maximizar a utilização de veículos e máquinas, bem como a capacidade de processamento.

4.1. TRABALHOS REALIZADOS PARA MODELAGEM DE SISTEMAS DE AUTOMATIZADOS DE MANUFATURA UTILIZANDO REDE DE PETRI

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos para modelagem de Sistemas Automatizados de Manufatura utilizando Rede de Petri. Esses trabalhos podem ser apresentados de acordo com o tipo de sistema modelado.

4.1.1. Modelos de PN para “Flow Shops”

Alla e Ladet (1984, apud Moore e Gupta, 1996) aplicam, pela primeira vez, Rede de Petri Colorida em Sistemas de Manufatura. O “Flow Shop” consiste de dois grupos de seis estações, operando independentemente entre si. Elas recebem peças através de um transportador e têm um ponto de carga e descarga de tais peças. O transportador possui mesas de deslocamento, de distribuição e desocupação. O modelo inclui o grupo de seis

estações e o transporte entre elas. Uma análise na rede demonstra que ela é viva, livre de conflito e limitada. Os autores caracterizam seu modelo como um modelo de FMS mas, uma vez que um grupo de estações é modelado, fica muito próximo de uma série de operações de “Flow Shops” operando em paralelo, com um ponto comum de entrada e um ponto comum de saída.

Alla e Ladet (1986, apud Moore e Gupta, 1996) usaram Rede de Petri Colorida com Temporização (CTPN) para modelar um “Flow Shop” que consiste de três estações alimentadas por um transportador, produzindo três produtos diferentes. Cada produto passa por uma única estação (uma máquina, um “buffer” de entrada e um “buffer” de saída). O modelo é analisado para mostrar que a rede é viva e limitada. Tempos determinísticos são adicionados para o transporte e para a usinagem, e o modelo resultante é simulado para determinar a capacidade máxima dos “buffers” de entrada e saída, os tempos de fabricação e a utilização de máquinas.

Martinez, Alla e Silva (1986, apud Morre e Gupta, 1996) usaram Rede de Petri Colorida para modelar um sistema de produção do tipo “Flow Shop”. Esse modelo considera duas máquinas trabalhando sobre dois tipos de peças, uma entrada, uma saída e um estoque intermediário. Os resultados de análise não são fornecidos.

Jothishankar e Wang (1992, apud Moore e Gupta, 1996) usaram Rede de Petri Estocástica para modelar um sistema “Flow Shop - Just in Time” com Kanbans. O modelo inclui duas estações, onde as peças processadas pela primeira estação são armazenadas num “buffer” até que sejam requisitadas pela segunda estação. Tão logo a segunda estação tenha requisitado a peça, uma ordem é enviada para a primeira estação para processar uma nova peça. A rede resultante é validada usando árvore de alcançabilidade e suas possibilidades de estado em regime para determinar o tempo total de espera, custo total e utilização; esse último como função do número de ordens no sistema.

4.1.2. Modelos de PN de Linhas de Transferências Automatizadas

Al-Jaar e Desrochers (1990a, apud Moore e Gupta, 1996) apresentaram dois modelos de Rede de Petri Estocástica Generalizada (GSPN) para analisar o desempenho de

Linhas de Transferência Automatizadas. Os autores utilizaram uma abordagem de desenvolvimento modular para o desenvolvimento do modelo de GSPN de sub-sistemas de manufatura, realizando análise estrutural dos sub-sistemas, e então uniram os sub-sistemas de maneira a preservar as suas propriedades estruturais.

O primeiro exemplo dado (um dos dois modelos) é um controlador de estação de usinagem. O modelo contempla os efeitos variação no “mix” (relação percentual entre diferentes tipos de elementos num conjunto) de tipos de peças, a preparação para fixação, o carregamento de programas e o tempo de carga de peças, para desempenho global (taxa de produção, tempo de produção, e utilização de máquina). O modelo considera dois tipos de peças.

O segundo exemplo é montado a partir de módulos pré-definidos e inclui duas linhas de transferência diferentes: um modelo de linha de transferência com duas máquinas e um “buffer” e um modelo de linha de transferência com quatro máquinas e três “buffers”. Os modelos das linhas possuem as seguintes hipóteses: os tempos de processamento, falha e reparo são exponenciais; as falhas ocorrem durante as operações; a primeira máquina nunca está desocupada e a última máquina nunca está bloqueada; e após a falha de uma máquina, a peça será processada desde o início.

4.1.3. Modelos de PN de “Job Shops”

Uma das primeiras aplicações de PN para manufatura foi colocada no artigo de Dubois e Stecke (1983, apud Moore e Gupta, 1996). Foram usadas Redes de Petri Temporizadas (TPN) para descrever, modelar e analisar um “job shop” e um “job shop” com bloqueio. O “job shop” consiste de três máquinas processando três tipos de peças, todas com roteamento diferentes, e três “pallets” (um “pallet” para cada tipo de peça).

Esse sistema foi modelado como três fluxos (um para cada tipo de peça) conectado pela necessidade de compartilhamento de máquinas. As peças chegam em uma ordem determinística e o tempo de processamento é incluído.

O “job shop” com bloqueio consiste de três máquinas e três tipos de peças, onde essas peças tem o mesmo roteamento, mas diferentes tempos de processamento, e elas não podem sair da primeira máquina até que a segunda esteja livre. Esse sistema é modelado com dois fluxos conectados pela necessidade de compartilhar e coordenar máquinas, e inclui processamento, “set-up” e tempo de transporte.

Ambos os modelos são seguros, vivos, sem conflito e conservativos. Uma análise de desempenho é feita usando o método de matriz de incidência e simulação. Os resultados incluem o comportamento periódico, a utilização de recursos, os engarrafamentos, tempo de ciclo mínimo e máxima taxa de produção. Nenhum resultado de desempenho é mostrado para o caso do sistema com bloqueio.

Archetti e Sciomachen (1989, apud Moore e Gupta) usaram GSPNs com arcos inibidores para modelar um sistema de AGVs que movimentam peças em um “job shop”. Esse “job shop” consiste de três máquinas, cada uma com um “buffer” de entrada e um de saída, um único tipo de peça, uma estação de carga e descarga, e duas áreas de espera. O sistema de AGVs é um “loop” serial, com pontos de carga e descarga fora do “loop” principal e usa, como regra de despacho, o AGV disponível mais próximo. Antes de se adicionar os arcos inibidores, uma análise é realizada para mostrar que o modelo é conservativo e limitado. Depois que os arcos inibidores são adicionados, usa-se simulação para avaliar a utilização de recursos, tempo de fabricação e número máximo de peças sem gerar conflito.

Hillion e Proth (1989, apud Moore e Gupta, 1996) aplicaram Marked Flow Graph Temporizado (TMFG) para modelar e analisar um “job shop” consistindo de m máquinas e n tarefas (ou trabalhos), onde cada tarefa é definida por uma seqüência. A abordagem é similar a utilizada por Dubois e Stecke (1983). Uma análise é realizada para mostrar que a rede resultante é viva e limitada, e os caminhos são enumerados para determinar o tempo de ciclo assim como a taxa de produção.

Claver e outros (1991, apud Moore e Gupta, 1996) usaram TMFG para modelar “job shops”. Eles propuseram uma abordagem “bottom-up” onde sub-modelos vivos, limitados e reversíveis são integrados para construir o modelo completo. As regras de integração preservam as qualidades no modelo maior. O modelo inclui um transportador

com capacidade n , duas máquinas idênticas, uma área de armazenamento, um “buffer” com capacidade r , para “overflow” do transportador e uma ponte para mover itens entre transportador e “buffer”. O modelo assume $n = 3$ e $r = 2$. Tempos são associados aos movimentos das peças e aos processamentos nas máquinas.

Laftit, Proth e Xie (1993, apud Moore e Gupta, 1996) aplicaram um método de otimização de marcação em grafos de eventos temporizados em modelos de “job shops” e sistemas de montagem para minimizar os tempos de fabricação. A otimização de marcação buscava encontrar uma marcação inicial que atingisse tal objetivo. Eles usaram uma abordagem heurística para reduzir o espaço de estado do sistema. O modelo consiste de quatro máquinas fabricando três tipos de peças, cada uma com seqüência e prioridades de fabricação diferentes. A construção do modelo segue a linha apresentada por Dubois e Stecke (1983) e inclui tempo de usinagem e de transporte.

4.1.4. Modelos de PN para Sistemas Flexíveis de Manufatura

Bruno e Marchetto (1985, apud Moore e Gupta, 1996) usaram Rede Predicado/Transição (antecessora da Rede de Petri de Alto Nível – HLPN) Temporizada para especificar e simular uma célula de manufatura, consistindo de três máquinas, com “buffer” de entrada e saída limitado, um armazém comum, e um robô que transporta peças do armazém para as máquinas. Para maximizar a utilização das máquinas, elas são podem requisitar uma próxima peça quando elas estão iniciando a usinagem de uma atual. A HLPN resultante é convertida para uma simulação de eventos discretos, contudo, não é apresentado nenhum resultado da simulação.

Kamath e Viswanadham (1986, apud Moore e Gupta, 1996) discutem aplicações de várias extensões de PN para FMS (PN Colorida para desenvolver simulação de FMS, Rede Predicado/Transição para análise de conflito, e PN Temporizada e estocástica para análise de desempenho) e apresentou dois exemplos. O primeiro é um modelo de PN Colorida para um FMS com rota fixada e vários tipos de peças, várias máquinas, uma estação de carga e

descarga, um armazém central de capacidade finita, e um estoque de “pallets” limitado. O armazém central é utilizado para estocar peças parcialmente processadas. Assumiu-se o fornecimento de transportadores como finito e o fornecimento de peças como infinito. Os autores sugeriram converter o modelo de CPN para simulação, mas não apresentaram resultados.

O segundo exemplo usa Rede Predicado-Transição para modelar uma Célula flexível de Manufatura com duas máquinas e um “buffer” com capacidade finita. Há dois tipos de peças, cada um com seu próprio processo de fabricação. O modelo assume um fornecimento infinito de peças, e um acesso aleatório das peças ao armazém. O modelo é analisado para avaliar a vida e a limitação.

Martinez, Muro e Silva (1987, apud Moore e Gupta, 1996) usaram PN de Alto-Nível (HLPN) para projetar um sub-sistema de coordenação de FMS. O exemplo consiste de n estações e um sistema de transporte uni-direcional formado por m transportadores. Cada estação tem um posto de trabalho e dois transportadores (um para entrada e outro para saída) com capacidade unitária. Uma análise qualitativa é usada para identificar possíveis conflitos. Uma análise quantitativa é usada para determinar o número ótimo de peças a serem designadas para uma única máquina.

Watson e Desrochers (1991) aplicaram GSPNs para modelar um FMS contendo tempos de atraso não exponenciais. O FMS consiste de um armazém central, dois sistemas de manuseio de materiais, e três estações. Embora pequeno, o modelo não poderia ser analisado utilizando Cadeias de Markov e teve que ser simulado. A análise de desempenho incluiu tempo de fabricação e taxa de produção.

Zhou e outros (1991, 1993) usaram PN Temporizadas para modelar uma célula flexível de manufatura. Em Zhou e outros (1991), o modelo é reduzido e analisado para verificar vida, limitação e reversibilidade usando árvore de alcançabilidade. A PN Temporizada foi também convertida para um modelo de MFG Temporizado equivalente e usado para determinar o tempo de ciclo. Em Zhou e outros (1993) o modelo original foi desenvolvido como um MFG Temporizado. A célula consiste de um sistema de manuseio de materiais (dois transportadores conectados por duas mesas de transferência), um sistema de representação de peças, uma estação com visão computacional, uma fresadora CNC, um

robô para carga e descarga de peças e movimento de peças entre os transportadores e as estações, e uma estação de furação apoiada por um robô. Há somente um tipo de peça com seqüência única.

Jafari (1992, apud Moore e Gupta, 1996) usou PN Colorida para projetar um controlador de chão de fábrica. Esse chão de fábrica consiste de células, um sistema de manuseio de material baseado em AGVs, um magazine automatizado de peças, e uma família de tipos de peças. As peças têm dois tipos de seqüência ou roteamento: no chão de fábrica (entre as células) e nas células (entre as estações dentro das células). Uma análise mostra que o controlador não tem conflitos.

Muro-Medrano e outros (1992, apud Moore e Gupta, 1996) aplicaram Inteligência Artificial e HLPN para modelar uma célula de manufatura robotizada, consistindo de duas máquinas, entrada e saída para armazenagem com acesso aleatório, um robô, três tipos de peças, e um plano de processo. Eles detectaram os conflitos e modificaram a marcação inicial para assegurar que a rede fosse viva.

Chan e Wang (1993, apud Moore e Gupta, 1996) usaram HLPN Estocástica para avaliar o desempenho de FMSs na fase inicial de projetos. Eles obtiveram uma Cadeia de Markov, que é usada para determinar utilização, identificar engarrafamentos e tempo de fabricação. O modelo inclui "pallets", tipos de peças, transportadores, máquinas e uma estação de carga e descarga. O tamanho do modelo é limitado devido a explosão no espaço de estado: o tamanho máximo para o modelo contempla quatro estações e cinco peças.

Inamasu e Porto (1993) propuseram um sistema de planejamento de produção para um FMS, cuja modelagem dos seus elementos foi feita utilizando-se PNs. O modelo foi elaborado para uma célula contendo seis estações de trabalho, um sistema de movimentação baseado em AGVs, uma estação de carga e descarga, e uma estação de manutenção de AGVs. Nesse modelo foram representados, separadamente, o plano de processo flexível de fabricação e os recursos do chão de fábrica (máquinas, veículos e caminhos). A análise utilizou o método de árvore de alcançabilidade, a partir da qual obteve-se tempos de fabricação em função das seqüência ensaiadas.

Liu e Wu (1993) usaram PN Temporizadas (TPN) para modelar um FMS e avaliar o seu desempenho. Eles usaram o método de matriz de incidência para determinar o “overflow” de “buffer”, desenvolveram um algoritmo para determinar os tempos de partida antecipadamente, identificaram conflitos e implementaram o modelo de TPN para obter regras de seqüenciamento ótimas. O modelo inclui um torno mecânico, uma fresadora, uma estação de inspeção, um centro de usinagem integrado, dois tipos de peças com duas seqüências diferentes de fabricação, três “buffers” internos, um “buffer” de saída e um estoque de “pallets”.

Raju e Chetty (1993b) usaram TPNs Coloridas (CTPNs) para projetar e avaliar Sistemas de AGVs para FMSs, considerando-se o número de AGVs, o tamanho do ramal (ou trecho de trajetória), o número de produtos e “pallets”, e o tamanho de “buffer”. Foi feita uma distinção entre transições P e transições T , onde uma transição P representa atividades de processamento, enquanto uma transição T é ligada ao local de um AGV e representa atividade de transporte. O modelo consiste de três centros de usinagem, uma estação para armazenamento de “pallets”, um sistema de movimentação de materiais baseado em AGVs, máquinas com “buffers” de “pallets”, quatro seqüências de trabalho e quatro “pallets”. Os caminhos dos AGVs incluem segmentos uni-direcionais e bi-direcionais. O modelo foi simulado usando um “pacote” de simulação especial e obteve-se como resultados a utilização de máquinas e AGVs em função da seqüência escolhida e o volume de produção em função do número de veículos disponíveis.

Raju e Chetty (1993a) usaram CTPNs incluindo transições P , T e C , e lugares D e C para modelar FMSs baseados em AGVs. As transições P e T são as mesmas definidas anteriormente, as transições C representam cruzamentos de caminhos de AGVs; os lugares D implementam algoritmos de decisão para determinar as “marcas” para recursos (máquinas, AGVs, robôs, etc.); os lugares C representam pontos de controle nos caminhos dos AGVs. Os autores usaram uma abordagem hierárquica de dois níveis onde o nível mais alto representa o sistema junto com o “mix” de peças e o nível mais baixo representa o sistema de AGVs. O modelo resultante foi simulado obtendo-se resultados sobre: a utilização de AGVs e máquinas; o tamanho máximo do “buffer” em função do número de “pallets”, de AGVs, regras de seqüenciamento e tamanho do caminho; horas totais de

máquinas em função do número de “pallets”; e tamanho máximo dos caminhos em função de regras de seqüenciamento.

Ausfelder, Castelain e Gentina (1994) aplicaram um tipo de HLPNs chamado PNs Objeto (OPNs) para projetar um sistema de controle de FMS. Eles apresentaram um modelo de controle de uma célula consistindo de um “buffer” de entrada, um “buffer” de saída, três estações (um centro de fresamento e dois tornos), e um sistema de movimentação de material consistindo de um transportador circular e dois robôs manipuladores. Os manipuladores movem peças entre os “buffers”, o transportador e as estações. Há três pontos de controle sobre o sistema: um no ponto de entrada e dois nas estações; cada ponto de controle tem uma “fila FIFO” com espaço para três “pallets”. O sistema produz dois tipos de peças: uma deve ser torneada em um torno específico; a outra deve ser torneada e então fresada, contudo ela pode ser torneada em qualquer torno. O modelo construído de uma forma modular usando primitivas para montar os módulos: um módulo descreve a seqüência de operação, outro o sistema de transporte e um outro os recursos. O modelo final foi validado pela validação dos módulos (o método não foi apresentado); a análise de desempenho foi realizada através de simulação; e nenhuma análise estrutural foi incluída.

Lee e DiCesare (1994) usaram PN Temporizada (TPN) para gerar seqüências de trabalho para FMSs. Eles usaram busca heurística para gerar a parcela de grafo de alcançabilidade necessário para obter a regra de seqüenciamento ótima (ou melhor) para minimizar os tempos de fabricação. A abordagem foi ilustrada através de quatro exemplos contendo várias tarefas com roteamento variável. O primeiro modelo é de um FMS com três máquinas, um robô e quatro tipos de tarefa; três tarefas têm três etapas no processo de fabricação e uma tarefa tem duas etapas. O segundo exemplo é um FMS com três máquinas e duas tarefas, cada uma tendo duas etapas no processo de fabricação. O terceiro tem três centros de usinagem e cinco tarefas (com quatro etapas e lotes de dez peças). O quarto tem cinco centros de usinagem, três robôs e dez tarefas com variação no número de etapas nos processos e no tamanho dos lotes.

Lee e DiCesare (1994) continuaram seu trabalho anterior para modelar FMSs com AGVs. Dois regras de despacho para AGVs foram experimentadas: uma política



centralizada onde um AGV é designado para uma tarefa e permanece nessa tarefa até que o trabalho seja finalizado e uma política descentralizada, onde os AGVs são compartilhados entre as tarefas, atendendo a todas as estações de trabalho. O modelo com política centralizada contempla uma estação de carga, três estações de trabalho, quatro tipos de tarefas e cinco AGVs. O modelo com política descentralizada consiste de quatro estações de trabalho, um AGV, três tipos de trabalho e um “buffer” de entrada e saída com capacidade para dez peças.

Sun, Cheng e Fu (1994, apud Moore e Gupta, 1996) usaram TPNs modificadas para distinguir entre quatro “tipos de lugares” (recurso, operação, intermediário e controle), para modelar um FMS com um sistema de AGVs. O sistema consiste de duas máquinas, um centro de usinagem, uma estação de carga e descarga, um robô, AGVs, um magazine automatizado e um “buffer” local de entrada e saída; o sistema tem três processos de fabricação com roteamento variável ou alternativo. O modelo foi dividido entre transporte e processo. Uma árvore de alcançabilidade truncada foi gerada usando busca heurística e usada para gerar o seqüenciamento.

Viswanadham e Ran (1994) usaram GSPNs para modelar células de manufatura contemplando falhas e reparo. Dois exemplos foram apresentados; o primeiro é uma célula consistindo de dois centros de usinagem idênticos, um AGV, “pallets”, controladores, e uma rede local, sendo que os AGVs e os centros de usinagem são propensos a falhas. O modelo foi analisado para disponibilidade e utilização de máquinas e AGVs. O segundo exemplo consiste de várias células de máquinas (cada uma contendo um número de máquinas, um robô para movimentação de peças e um “buffer” local limitado), um sistema de movimentação de material, uma estação de carga e descarga, e um armazém central. O problema foi formulado para o caso geral; um exemplo específico de GSPN foi analisado para duas células, um sistema de movimentação baseado em transportadores, pessoas para reparo, e regras de prioridade para reparo. Os resultados incluem disponibilidade de máquinas e elementos para movimentação e taxas de produção esperadas, como função de taxas de reparo e falhas e número de pessoas disponíveis para reparo.

Yim e Barta (1994, apud Moore e Gupta, 1996) usaram HLPNs com arcos inibidores e tempo para gerar um modelo de simulação para análise de desempenho de

FMSs. O modelo consiste de duas células de máquinas, duas estações de trabalho, uma estação de carga e descarga, e um AGV. Cada célula tem dois “buffers”, duas máquinas e um robô; cada máquina tem um “buffer” de entrada e saída, e tempos de avaria e reparo. As regras de despacho de AGVs uma estratégia de “puxar” tarefas. Os resultados de simulação incluem: número de tarefas completadas, tempo de fabricação, taxa de saída e utilização de máquinas e AGVs.

Ferrarini e Trioni (1996) propuseram uma abordagem de modelagem de sistema de manufatura utilizando PN hierárquica, considerando recursos compartilhados e sincronização, por eles definida como sincronização generalizada.

Seifoddini e Zhang (1996) usaram PN e simulação para auxílio à tomada de decisão no controle de sistemas de manufatura. A abordagem para modelagem proposta, buscou destacar as atividades que ocorriam em paralelo, de maneira a implementar uma simulação de forma também paralela, para obtenção dos resultados. O modelo do exemplo contempla três células de trabalho (com máquinas, robôs e “buffers” internos), dois “buffers” entre as células, um “buffer” de entrada e um de saída. A análise da PN utilizou o método de matriz de incidência.

Ezpeleta e Colom (1997) propuseram um método automático de síntese de PN Colorida para controle de FMS. A abordagem para construção do modelo considerou separadamente a planta do FMS e os planos de processo de diferentes tipos de peças. Num segundo passo esses modelos foram conectados e a análise foi feita para verificação de conflitos a fim de garantir o processamento das peças.

Jeng (1997) apresentou uma teoria de síntese de PN para modelagem de FMS com abordagem de composição modular para construção do modelo. As interações foram colocadas como transições comuns. O FMS estudado contempla três células de trabalho, um sistema de movimentação baseado em AGVs, dois “buffers” de entrada (para peças do tipo 1 e 2), um “buffer” intermediário e dois “buffers” de saída (para os produtos de tipo 1 e 2). A análise da rede final mostrou ser conservativa, limitada e viva.

Ksieh e Kang (1998) apresentaram um método de modelagem para controle, baseado em PN que transforma automaticamente um modelo de caminhos de um sistema de

veículos auto-guiados em um modelo de controle de baixo nível. O ponto base para geração do modelo de controle é o uso de algumas funções de controle de entrada e saída de valores digitais. Um sistema de AGVs de um laboratório foi utilizado para verificar a eficiência do modelo gerado.

Lewis e outros (1998) aplicaram PN para análise do problema de conflitos em sistemas reentrantes. A tarefa de cálculo foi simplificada pelo uso das matrizes de descrição do sistema. Então desenvolveram uma política de controle de despacho que evita conflitos.

Peng e Chen (1998) propuseram uma estrutura para controle de seqüenciamento de tarefas FMS em tempo real, de forma a adotar diferentes políticas de despacho, considerando-se as mudanças de estado no “chão de fábrica”. Uma característica particular é que, dada uma alteração no estado do “chão de fábrica”, antes de qualquer alteração na política vigente, faz-se uma simulação para avaliar o desempenho de diferentes políticas.

Feldmann e Colombo (1998) usaram PN Colorida modificada, para modelar e validar uma estrutura de controle de um FMS. O resultado final foi uma especificação formal de PN Colorida baseada no controle de coordenação de recursos e estruturas lógicas de controle para o seqüenciamento de tarefas.

Kuo, Huang e Yeh (1998) desenvolveram uma PN Temporizada Colorida para modelar as atividades em um FMS, utilizando uma abordagem modular e orientada a objeto. A proposta de validação, até então não realizada, foi o uso da técnica em um FMS de um centro de pesquisa em automação da manufatura existente.

Calvez e Bonhomme (1998) usaram PN Temporizada para modelar um controlador de seqüência de fabricação, voltado para transitórios causados pela modificação da taxa de permanência de peças em um sistema de manufatura.

Hsieh, Hwang e Chou (1998) apresentaram uma estrutura hierárquica baseada em PN para modelar a operação de armazenagem e recuperação de peças de um magazine automatizado. A estrutura hierárquica foi construída em quatro diferentes camadas relativas a comandos: escrita, interpretação, compilação e execução. Para simplificar a estrutura, eles criaram “macro-lugares” representando atividades complexas. Foi feita uma análise na PN para avaliar o comportamento do magazine.

Jeng e Chen (1999) usaram um método de busca heurística baseada em PN para definir uma seqüência de fabricação em FMS. Foi usado um modelo de PN Temporizada e buscado uma seqüência de disparos da rede, desde um estado inicial até um estado final, com o objetivo de minimizar os tempos de fabricação, evidenciando uma seqüência de custo mínimo. O método de análise usado foi o de equação de estado.

Wu (1999) desenvolveu um modelo de PN chamado Rede de Petri Colorida Orientada a Recurso, para modelar concorrência de recursos em um processo de fabricação, e permitir um funcionamento de um FMS sem conflitos. Com isso, gerou uma política de controle de um exemplo para ilustrar a abordagem.

Moore e Gupta (1999) desenvolveram modelos de PN Colorida Estocástica de sistemas de fabricação "just-in-time", usando duas políticas: sistemas "kanban" tradicional e sistema kanban flexível. Os modelos elaborados são "vivos" e "limitados", e podem ser usados para simular características de produção.

Zhang e outros (1999) discutiram sobre modelagem orientada a objeto através de PN para células flexíveis. Além disso definiram modelos de objetos de manufatura como blocos de construção reutilizáveis.

4.1.5. Modelos de PN para Sistemas de Montagem

Dubois e Stecke (1983, apud Moore e Gupta, 1996) usaram TPNs para modelar um processo de montagem onde duas peças diferentes eram usinadas e montadas em um produto final. No sistema havia três máquinas, uma para usinagem de cada peça e uma para montagem, uma estação de carga e descarga, e dois tipos de transportadores. O modelo é seguro, vivo e sem conflitos. Usou-se o método de matriz de incidência e também simulação para uma análise de desempenho.

Al-Jaar e Desrochers (1990) usaram GSPNs para avaliação de desempenho de um sistema de produção consistindo de duas máquinas dedicadas que pegavam peças de um

inventário e colocavam peças trabalhadas nos seus “buffers” de saída, uma estação de montagem que pegava as peças dos “buffers” e colocava as unidades montadas em seus “buffers” de saída para ser processada em um centro de usinagem. Os resultados incluem taxas de produção, tempo de produção e utilização de máquinas.

Cruete, Bourey e Gentina (1991, apud Moore e Gupta, 1996) usaram PN Objeto para especificar e validar seqüências de operação para montagens em FMSs. Eles usaram uma abordagem de modelagem hierárquica, onde cada objeto foi definido e então conectado através de uma série de relações. O modelo inclui um sistema transportador, três robôs, uma área de armazenagem, uma área de montagem, uma máquina, uma estação de trabalho, e duas peças que são usinadas e então montadas. O processo de fabricação foi considerado, mas não foi incluso no modelo final. A análise considerou conflitos e gerou uma especificação de seqüência de operação passo a passo.

Ciardo e Triverdi (1991, apud Moore e Gupta, 1996) propuseram uma técnica de decomposição para quebrar um modelo grande em sub-modelos independentes, e aplicaram método de análise de GSPN para os sub-módulos. A técnica é ilustrada para um FMS com montagem, onde existem seis máquinas, três tipos de peças (duas das quais podem ser montadas em um quarto produto) e um número limitado de “pallets”. Os resultados incluem taxas de “fabricação” (montagem) e utilização de recursos.

Koh e DiCesare (1991, apud Moore e Gupta, 1996) apresentaram um método de transformação linear para redução e síntese de PNs preservando vivacidade e limitação. Eles demonstraram a abordagem em um sistema de montagem flexível (AMS) com a montagem de duas peças do tipo 1 e três peças do tipo 2 em um único produto. O AMS consiste de duas estações, três robôs, um buffer e três transportadores. O modelo final é construído a partir de seus sub-componentes para garantir que a rede é viva e limitada.

Koh e outros (1991, apud Moore e Gupta, 1996) usaram PN Colorida para modelar sistemas integrados de manufatura (CIM), cujos sub-sistemas incluem MRP, planejamento de processo e controle de chão de fábrica. A abordagem é aplicada ao chão de fábrica consistindo de uma célula de usinagem, um sistema de inspeção ótico, uma célula de montagem e dois “buffers”.

Watson e Desrochers (1991) apresentaram um modelo de GSPN para uma estação de montagem robotizada consistindo de uma tarefa de montagem e inspeção, e uma tarefa de re-trabalho. A análise utilizou Cadeias de Markov.

Zhou e Leu (1991, apud Moore e Gupta, 1996) usaram PN Estocástica para modelagem de uma estação de montagem robotizada, consistindo de dois robôs, um alimentador de componentes e uma placa de circuito impresso onde os robôs desempenham tarefas de inserção. O interesse primário foi evitar colisão dos robôs. O modelo inclui erros dos robôs e falhas de inserção, assim como inserção e tempos de movimentação. O modelo é seguro, vivo e reversível.

Ezpeleta e Martinez (1992) aplicaram PN Ordinárias e uma composição hierárquica para especificar um FMS. O exemplo é uma operação de montagem numa planta de fabricação de fornos elétricos com diferentes modelos. O processo de montagem tem três passos: pré-montagem, carga no local de montagem e montagem.

Zhou e outros (1992b, apud Moore e Gupta, 1996) usaram PNs para projetar, gerar e implementar um controlador de eventos discretos para operação em um FMS. O sistema inclui usinagem, montagem, movimentação de material e armazenagem. Compreende duas máquinas, uma estação de montagem, três robôs, quatro transportadores, dois dispositivos de armazenagem dedicados, um magazine automatizado, e “pallets” universais. Existem vários tipos de matéria-prima, uma usinagem e uma montagem final. O modelo resultante é vivo, reversível e limitado.

D’Souza e Khator (1993, apud D’Souza e Khator, 1994) aplicaram PNs para modelar o controle para uma célula de montagem. O modelo contempla quatro estações de montagem e uma de transferência, cada uma tendo um “buffer” de entrada e saída, um transportador e um magazine automatizado. O modelo é especificado pela representação da planta da fábrica em uma PN como uma matriz de forma. O modelo foi analisado para conflitos e tempos de ciclos.

Choi, Kuo e Jackman (1994, apud Moore e Gupta, 1996) aplicaram TPN Colorida para modelar uma célula com montagem, validar a lógica de operação do sistema e analisar o desempenho de funcionamento. Eles demonstraram como diferentes extensões de PN

podem ser usadas para modelar sistemas de manufatura. Esses conceitos são ilustrados para uma célula consistindo de um “buffer” de entrada, um “buffer” de saída, três transportadores, três estações e três robôs. Cada transportador movimentava peças entre o “buffer” de entrada e as estações; dois transportadores também movem peças para o terceiro transportador; esse terceiro transportador é usado para mover as peças para o “buffer” de saída. Um robô é designado para cada estação; contudo uma delas pode servir a uma segunda estação se houver uma falha. A validação lógica usa o método de alcançabilidade. Os autores apresentam uma série de casos de estudo mostrando o impacto de tempo de processamento, disponibilidade de acessórios, número de robôs, capacidade de “buffers” e taxas de falha e reparo.

Tchako e outros (1994, apud Moore e Gupta, 1996) propuseram o uso de PN com Inteligência Artificial e simulação para gerar seqüências de processos com diferentes regras de despacho em uma estrutura de controle distribuída para FMS com montagem. O modelo inclui uma célula de usinagem, uma célula de montagem, um sistema transportador, dois robôs manipuladores, rede de comunicação, assim como processo de fabricação, comunicação, transporte e tempos de preparação de máquinas. Os resultados de simulação incluem uma seqüência, tempo de fabricação e utilização de recursos.

Venkatesh e outros (1994a, apud Moore e Gupta, 1996) usaram TPNs para modelar um sistema de montagem robotizado. O modelo contempla três robôs, uma estação de carga, uma estação de inspeção e uma estação de descarga. Um robô fixa peças, um segundo realiza montagem e um terceiro inspeciona e retira o produto montado. O modelo é simulado para determinar o impacto taxas de falhas, a taxa de produção e a utilização de recursos.

Moore e Gupta (1998) propuseram um algoritmo que gera automaticamente uma PN que modela o processo de desmontagem de produtos, baseado na geometria de peças, para alguns casos específicos. A análise da PN gerada é feita pela comparação com o plano de processo de desmontagem. A aplicação pretendida é para a área de empresas de reciclagem e re-manufatura.

Zussman e Zhou (1999) propuseram uma PN de Desmontagem, validada matematicamente, para modelar o planejamento adaptativo de processo desmontagem. O

método proposto e o algoritmo foram demonstrados através de um exemplo de desmontagem de telefone.

**PROPOSTA DE ABORDAGEM DE MODELAGEM DE
SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MANUFATURA,
USANDO PN VIRTUAL**

Vários de tipos de Sistemas Automatizados de Manufatura (AMS) têm sido utilizados na indústria, na busca por melhores e mais adequados resultados para atendimento às solicitações do mercado consumidor.

Esses sistemas, como já comentado anteriormente, têm sido estudados para obtenção de técnicas de planejamento e controle, considerando-se diferentes abordagens e técnicas.

Entretanto, considerando-se os trabalhos até então desenvolvidos, ainda persistem alguns problemas para que se possa planejar e controlar sistemas complexos. Assim, esse trabalho propõe uma contribuição para solução desses problemas, na forma de uma metodologia de modelagem de AMS.

A estratégia proposta neste trabalho tem como principal suporte o plano de processo de fabricação, ou seja, desenvolve-se modelos de componentes do sistema, levando-se em consideração a seqüência de utilização de recursos e as posições ocupadas pelas peças, ao longo dessa seqüência.

Isso significa que os módulos de modelos deverão ter como nós (lugares e transições) todos os pontos por onde a peça passará e também todas as operações e ações necessárias para cumprir o plano de processo, descrevendo então a localização da peça a cada instante e a utilização de recursos.

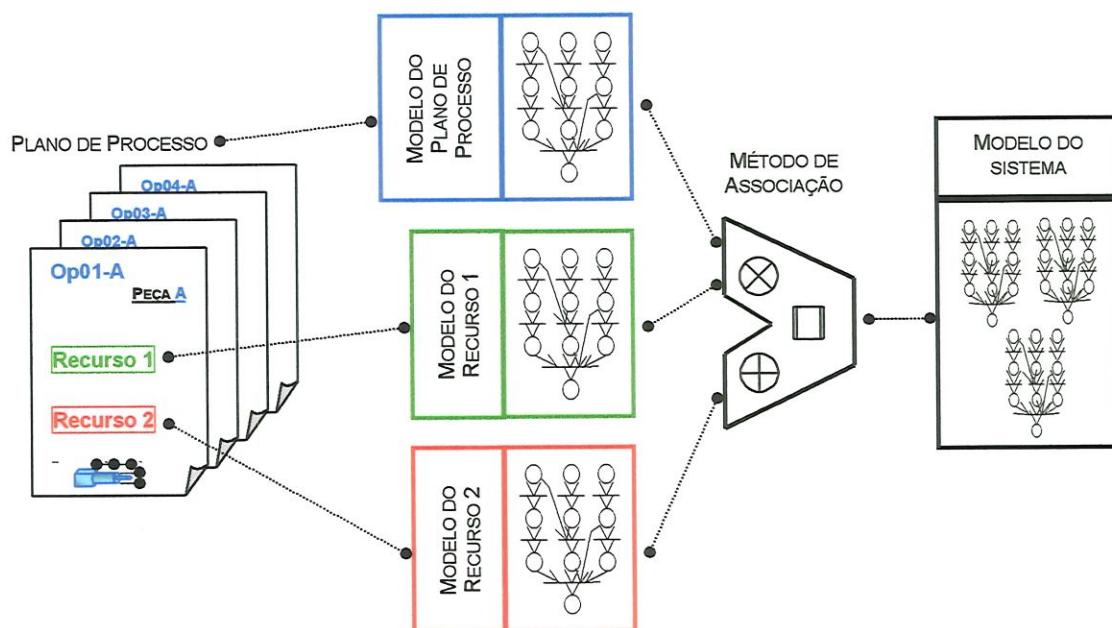


Figura 5.1 - Esquema da metodologia de modelagem proposta

A figura 5.1 mostra um esquema da metodologia proposta. A partir do plano de processo de uma determinada peça, elabora-se o modelo do plano, os modelos de cada um dos recursos e, após a utilização do método de associação, obtém-se o modelo geral do sistema. Entretanto cabe citar que, para a utilização do método de associação, além de se elaborar os modelos com base no plano de processo, deve-se utilizar uma nova extensão de PN chamada PN Virtual.

Alguns dos elementos descritos no capítulo 2 (robôs, magazines e transportadores) não serão incluídos para elaboração de módulos do modelo devido às considerações que serão apresentadas a seguir.

No caso dos robôs, existem duas categorias distintas: os manipuladores e os chamados programáveis. O manipulador estará contemplado no modelo como ponto de transferência entre o sistema de AGVs e as estações de trabalho ou de carga e descarga, o que poderá ser melhor observado mais a frente. Quanto ao robô programável, pode ser considerado como uma estação de trabalho caso uma tarefa de transformação da peça a ele for atribuída, caso contrário, pode ser considerado como um manipulador.

Os transportadores podem ter um modelo similar ao do sistema de AGVs; e o magazine de peças deverá estar sempre nos extremos de um plano de processo flexível, o que será representado nos módulos do modelo como uma posição inicial ou final dentre as posições ocupadas pelas peças.

Caso se queira contemplar maiores detalhes de comportamento desses elementos, pode-se construir outros módulos, ou mesmo “refinar” ainda mais os módulos propostos, seguindo-se o metodologia proposto.

A seguir será apresentada a proposta de modelos dos quatro elementos básicos anteriormente citados (estação, veículo, rota e plano de processo). Os modelos propostos foram baseados no trabalho de Inamasu (1995), com algumas alterações nos seus elementos, de maneira a permitir implementação do método aqui proposto.

5.1. ESTAÇÃO DE TRABALHO

A estação de trabalho considerada possui uma área de trabalho em comum com o sistema de transporte, onde um veículo pode estacionar para realizar uma carga ou descarga de peças, como esquematizado na figura 5.2.

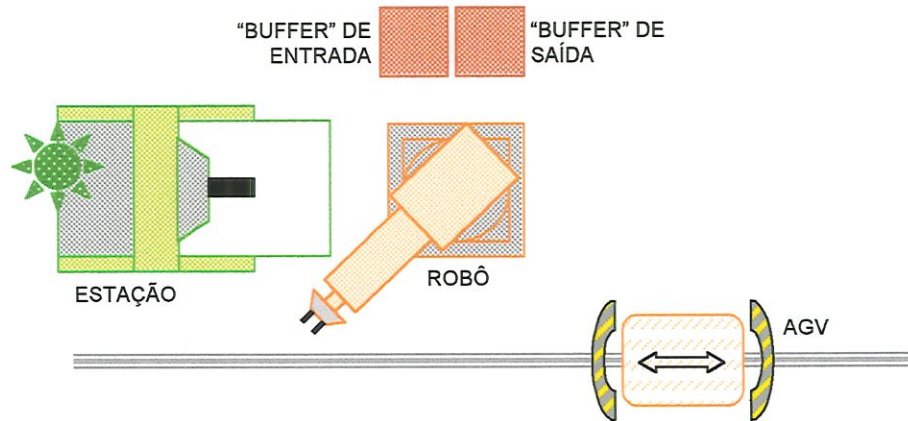


Figura 5.2 - Estação de trabalho e veículo, com suas áreas em comum

O modelo de uma estação pode ser construído de modo completo, representando todo o funcionamento e controle. No contexto aqui apresentado serão colocados apenas os estados relativos às posições ocupadas pelas peças em uma estação e outros estados para permitir seu controle ou para administrar a utilização dos recursos internos básicos.

Os lugares mínimos necessários identificados para representar a passagem de uma peça em uma estação, com “buffer” para apenas uma peça, são:

- peça (a ser executada) sobre o veículo (p_{vl}), onde p refere-se um lugar (“place”), v refere-se um veículo e l refere-se ao carregamento da peça (“loading”);
- peça (a ser executada) numa posição intermediária (p_{vil}), onde vi indica ser um lugar “virtual”;
- peça aguardando posição disponível na máquina (p_{bl}), onde b se refere-se a um “buffer”;

Uma vez que alguns dos lugares do modelo da estação representam conexões com o modelo do veículo, haverá uma dependência de estados do veículo para a execução de funções lugar-a-lugar (seqüência de transições).

Na seqüência apresentada, vale destacar os lugares p_{vil} e p_{viu} que representam lugares virtuais para armazenamento de peça entre a estação e o veículo. Pode-se considerar que uma marca nesses lugares representam que a peça está no manipulador da estação, sendo transferida de um local ao outro.

Esses lugares serão os nós do módulo, através dos quais a associação com outros módulos será realizada. Assim, toda vez que houver um nó presente em um módulo, onde sua representação indica características de um outro módulo, esse nó deve ser tratado como virtual, entretanto isso será melhor tratado posteriormente. Além disso, tais lugares são chamados de “virtuais” porque não farão parte do modelo final associado, servindo como “ponto base” para a associação.

Tendo-se esses elementos básicos na rede, pode-se então introduzir novos elementos de modo a considerar particularidades no controle da estação, como por exemplo em relação ao controle de acesso ao buffer (limitação) ou ao uso do manipulador de carga e descarga.

Com essas considerações realizadas pode-se melhorar o modelo anterior chegando-se a um novo, como mostrado na figura 5.4.

Nesse modelo o lugar $p11$ serve como contador de peças na estação e pode funcionar como limitador de acesso, caso a ele seja atribuída uma capacidade; o lugar $p15$ mostra a disponibilidade do manipulador que é responsável por toda transferência de posição das peças; o lugar $p13$ serve como limitador do “buffer” de armazenamento local; e o lugar $p16$ mostra a disponibilidade da posição de trabalho da estação.

os lugares com associação com o veículo continua sendo preservado de maneira a permitir a construção do modelo final geral.

Uma outra possível variação de característica de estação seria uma estação sem buffer para armazenamento de peças, portanto o modelo poderia ser simplificado em relação ao primeiro apresentado.

Entretanto, os elementos que representam as posições da peça descritos no primeiro modelo, ainda que não representem um estado físico real do sistema, devem permanecer no modelo de modo a permitir a associação aos outros módulos do sistema. Nesse caso apenas a sua interpretação é que deveria ser ligeiramente diferente, uma vez que há eventos que não têm funcionalidade para o sistema.

Então, o modelo desse tipo de estação fica como mostrado na figura 5.6.

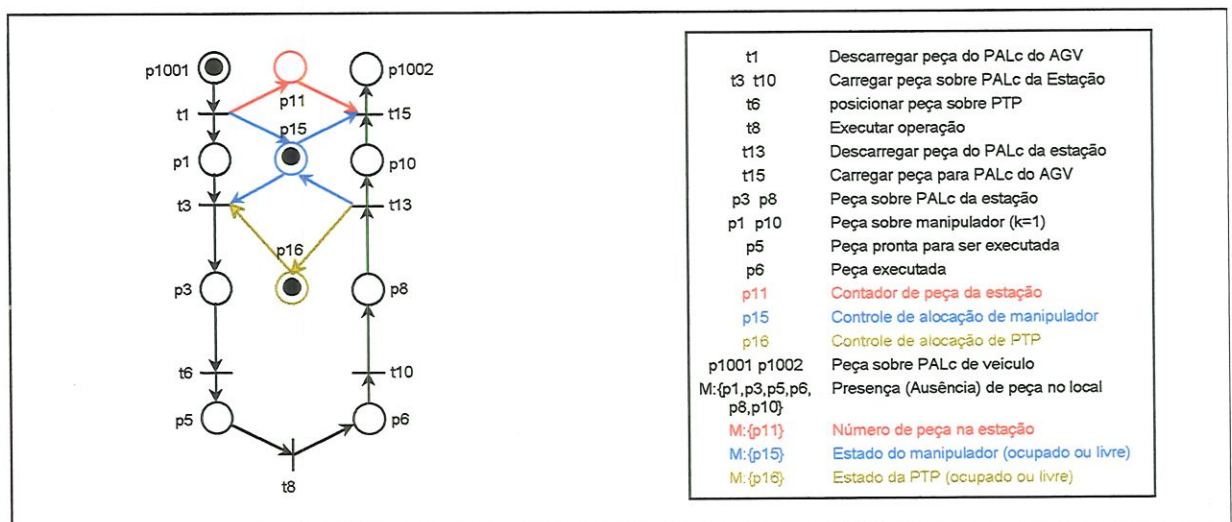


FIGURA 5.6 - Modelo em PN de uma estação de trabalho sem buffer, com elementos de controle.

5.2. VEÍCULO AUTO-GUIADO

O veículo auto-guiado (AGV) é parte integrante do sistema de transporte e possuirá, além de uma relação com a estação de trabalho, uma segunda relação com o modelo rotas.

Um AGV pode possuir uma variação de características, mas como observado nos modelos de estações anteriormente descritos, há a possibilidade de representação das principais características do objeto (no caso relativas ao processo de fabricação) e, caso haja necessidade de refinamento no modelo ou mesmo uma alteração de características, isso pode ser implementado preservando-se as condições originais indispensáveis para a associação do modelo a outros módulos.

Assim, para o caso do AGV, o modelo para representar o posicionamento da peça é mostrado na figura 5.7, onde:

- p_vl e p_vu : peça sobre “buffer” da estação;
- p_vil e p_viu : peça numa posição intermediária (virtual);
- p_bf : peça sobre “buffer” do AGV ou peça sobre o AGV.

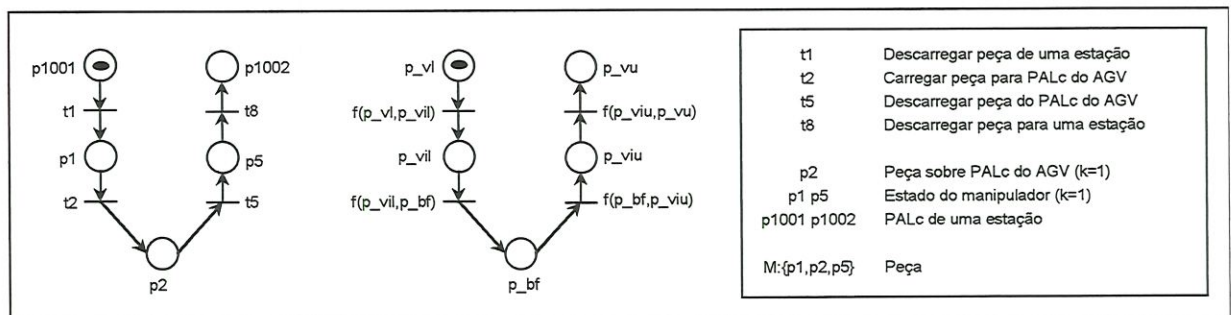


FIGURA 5.7 - Modelo de um AGV para representar posicionamento de uma peça.

Nessa figura pode-se identificar a seqüência de posições de peças sendo descarregada da estação e colocada sobre o “buffer” do veículo, e também no sentido inverso.

Uma pequena variação no modelo pode ser observada quando se quer representar um AGV que pode transportar, por exemplo, até três peças no seu “buffer”. Nesse caso o modelo resultante pode ser visto na figura 5.8, onde pode-se observar que os lugares que têm relação com o módulo estação, continuam existindo.

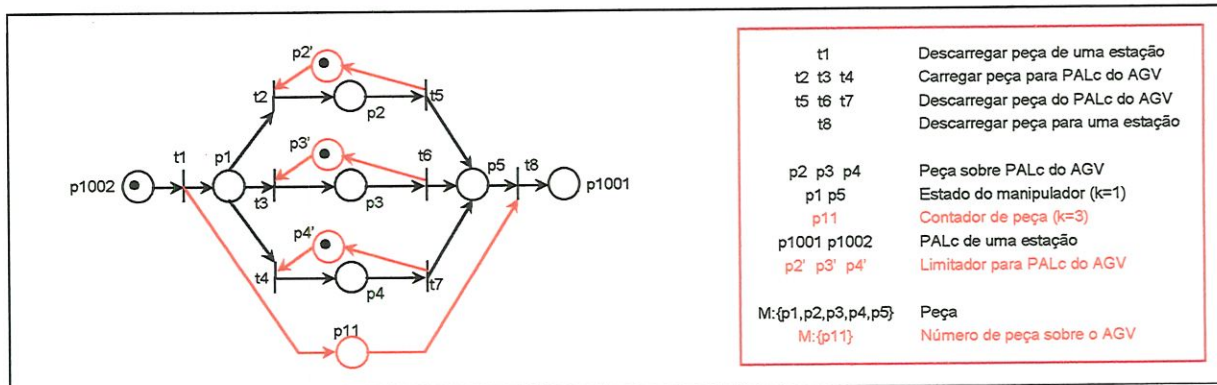


FIGURA 5.8 - Modelo de um AGV para representar posicionamento de três peças.

Pode-se notar ainda a existência de um contador de peças, representado pelo lugar p11, cuja capacidade é igual a três, e serve para limitar o número de peças que são depositadas sobre o veículo.

Caso haja necessidade de tratamento de outras características do AGV para seu controle, como por exemplo a vida da bateria, pode-se inserir novos elementos ao modelo, desde que a estrutura que contempla a movimentação da peça seja preservada.

5.3. ROTAS OU TRAJETÓRIAS

Para modelagem de rotas propõe-se nesse trabalho a construção de um modelo que indique as possíveis posições de peças dentro de um “layout” de uma fábrica. Essa abordagem também foi utilizada por Morandin e Inamasu (1995) e Inamasu (1995).

Dessa forma, para que se possa mostrar um modelo de PN de rotas de veículos em um Sistema Automatizado de Manufatura, torna-se necessária a apresentação de um

exemplo de “layout” de chão de fábrica. A partir disso pode-se avaliar todos os possíveis caminhos de veículos e então construir o modelo de rotas.

Tome-se como exemplo o “layout” apresentado na figura 5.9.

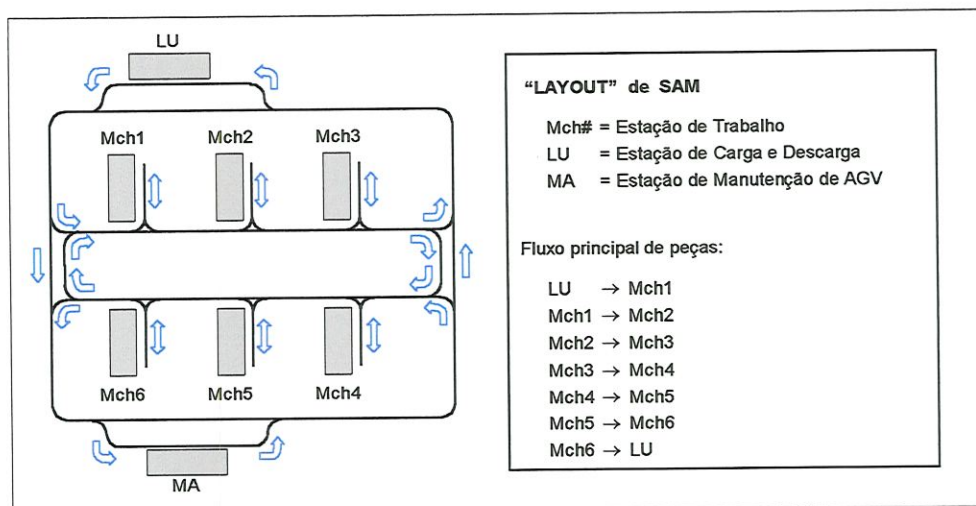


FIGURA 5.9 - Exemplo de um “layout” de Sistema Automatizado de Manufatura

Nesse “layout” existem seis estações de trabalho, uma estação de carga e descarga de peças (que pode ser interpretada como local de armazenamento inicial e final) e uma estação de manutenção de veículos.

Os possíveis caminhos percorridos, permitem a movimentação de peças entre quaisquer dois pontos definidos num plano de processos flexível, ou seja, para que se cumpra uma determinada seqüência de “paradas” para usinagem ou transformação da peça, definida no plano de processos, existe pelo menos um caminho possível que permite o deslocamento dessa peça, de uma primeira estação para uma segunda, sem ter que passar por uma terceira.

Pode-se verificar ainda, pela figura, que existem trechos de trajetória exclusivos para carga e descarga de peças em cada estação.

Nesse “layout” pode-se fazer algumas alterações, prevendo-se a necessidade de pontos de parada de veículos que não estejam transportando uma peça, em um “buffer” de

veículos, ou considerar-se que esses veículos “desocupados” permaneçam no local onde foi seu último destino. Nesse trabalho será considerado o segundo caso.

Uma vez observado esse “layout”, procura-se então descrever todos os possíveis caminhos em uma PN. Esse modelo resultante pode ser observado na figura 5.10.

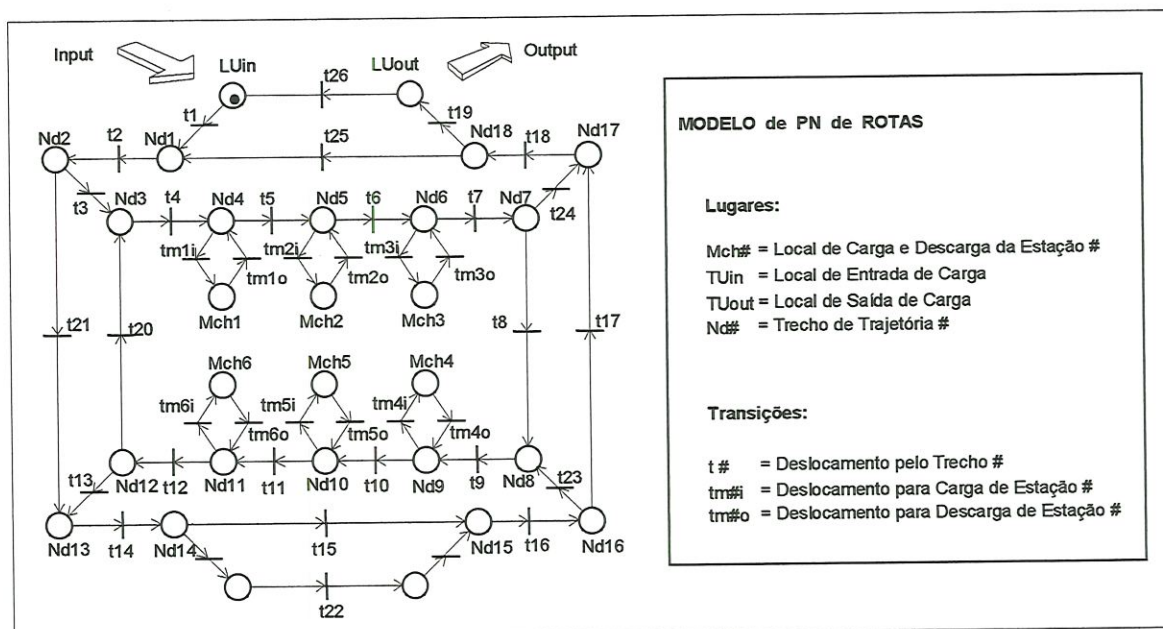


FIGURA 5.10 - Modelo de PN de rotas para o “layout” da figura 5.9

As rotas foram divididas em trechos de modo a não permitir que mais que um veículo ocupe um único trecho no mesmo momento.

Na figura anterior, cada lugar representa um trecho da rota e, uma marca num lugar indica a presença de um veículo no trecho. Para que dois ou mais veículos não ocupem um único trecho no mesmo momento, os lugares são limitados a uma marca.

Um ponto, ou pontos, de destaque nesse modelo são os lugares que servirão como nós de associação com outros módulos.

Como se busca o cumprimento de um plano de processo, a abordagem aqui sugerida é contemplar como “pontos de associação”, os mínimos lugares necessários para isso, ou seja, considera-se apenas os pontos onde as peças estão nas estações de trabalho ou na estação de carga e descarga para a associação com os outros módulos.

Os lugares onde se realizam as cargas e descargas (p_{LUin} , p_{LUout} , p_{Mch1} , p_{Mch2} , p_{Mch3} , p_{Mch4} , p_{Mch5} e p_{Mch6}) serão genericamente denominados de “ p_{parkLU} ” e estarão associados a pontos de parada de veículos, dentro do cumprimento do plano de processos, ou seja, estarão associados ao modelo de estações, embora não tenham sido descritos quando da construção daqueles módulos.

Ainda mais especificamente, o ponto onde se efetua a carga será descrito no modelo como p_{parkL} , e o ponto onde se efetua a descarga como p_{parkU} . Entretanto isso será melhor abordado mais à frente, quando for discutida a associação dos módulos.

Um outro aspecto a se considerar é que, uma vez obtido um modelo de rotas pode-se, através de análises da PN, avaliar todos os possíveis caminhos, que ligam quaisquer dois pontos e definir algumas rotas preferenciais com base em algum critério objetivo. Isso pode então ser utilizado como estratégia de programação, ou ainda para estratégias de controle do sistema.

Nessa etapa surge mais uma consideração a ser trabalhada. Considere-se que exista trabalhando no sistema, mais do que um AGV, o modelo deveria iniciar com mais do que uma marca representando, por exemplo, dois AGVs. Não haveria possibilidade de se distinguir no modelo os dois AGVs.

Esse problema foi discutido por Inamasu (1995) que propôs uma estratégia de modelagem, utilizando uma idéia obtida das técnicas de modelagem de PN coloridas porém, mantendo-se a utilização de PN Lugar-Transição, que é o formato de descrição dos módulos até então apresentado nesse trabalho.

Para construção de um modelo contemplando mais que um AGV, basta fazer uma alteração no modelo de rotas, colocando-se elementos que parecem com uma duplicação paralela do modelo original.

Essa idéia pode ser melhor explicada pela observação de um modelo de um trecho de rota, como mostrado na figura 5.11.

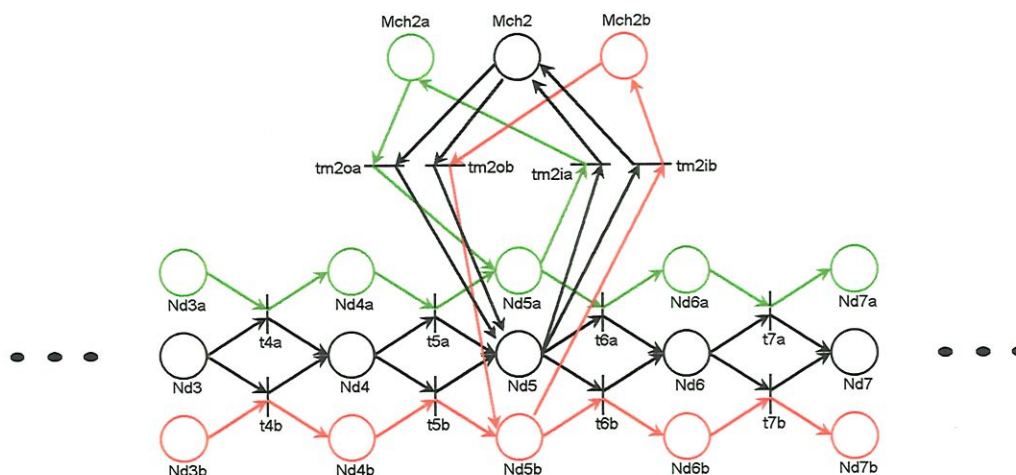


FIGURA 5.11 - Modelo de trechos de rota para dois AGVs, construído a partir do modelo da figura 5.10 (Trecho de rota entre as estações 1, 2 e 3).

Nesse modelo pode-se verificar que existem lugares que representam a presença de veículos em trechos da trajetória, como havia anteriormente no modelo da figura 5.8, porém com uma representação de dois veículos (*a* e *b*).

Todos os lugares da PN permanecem limitados a uma marca e as transições que descrevem movimentos de veículos, são individualizadas para cada um deles, por exemplo a transição *t4a* representa o movimento do veículo *a*, desde posição denotada por *Nd3a* até a posição denotada por *Nd4a*; enquanto que a transição *t4b* representa o movimento do veículo *b*, desde posição denotada por *Nd3b* até a posição denotada por *Nd4b*.

Caso se queira acrescentar um novo AGV no sistema, basta “copiar” os elementos representativos de trechos, descrevendo-se adequadamente cada um deles.

Embora isso possa trazer um aumento de elementos no grafo, a sua apresentação e construção pode ser feita sem muitas dificuldades.

No caso desse sistema, o modelo representativo do “Módulo Rotas”, considerando-se dois AGVs, ficaria como apresentado na figura 5.12.

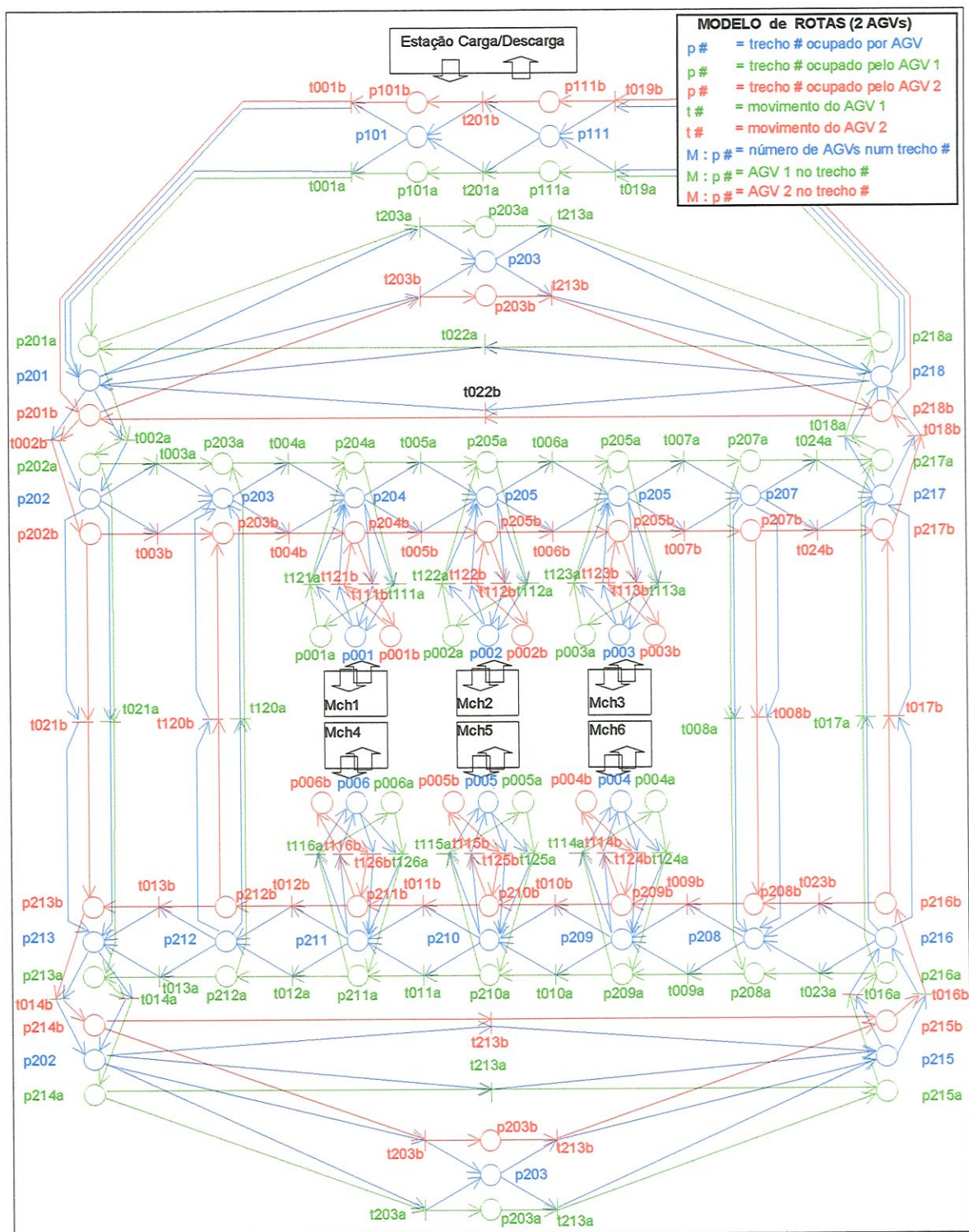


FIGURA 5.12 - Modelo de rotas para o “layout” da figura 5.9, para dois AGVs.

Embora essa figura seja uma extensão dos modelos das figuras 5.10 e 5.11, as denominações dos lugares e das transições sofreram uma alteração, para aproveitamento posterior.

Nela pode-se observar a representação de todos os possíveis trechos ocupados por cada um dos dois AGVs, que poderiam estar inseridos no sistema.

5.4. PROCESSO ALTERNATIVO

O processo alternativo de fabricação é que definirá a configuração do modelo final do Sistema Automatizado de Manufatura.

Durante esse processo, a peça será deslocada de posição em posição, desde uma estação de carga ou armazenamento inicial, passando por estações de trabalho, e finalizando numa estação de descarga ou de armazenamento final.

Seu transporte deverá ser realizado por um veículo e portanto, entre duas estações, a carga estará sobre o veículo.

Para descrição de um processo de fabricação, deve-se indicar a seqüência de operações a serem realizadas em uma peça e isso deverá estar descrito no modelo de PN do processo.

Assim, os lugares mínimos necessários identificados para montagem do modelo de processos são os lugares indicativos de estados da peça após a passagem por cada uma das estações.

Tome-se como exemplo uma pequena etapa de um processo que indica duas operações, a operação *op1* e a operação *op2*, sendo que *op2* pode ser executada em duas máquinas similares. Pode-se construir um modelo representativo dessa seqüência conforme mostrado na figura 5.13.

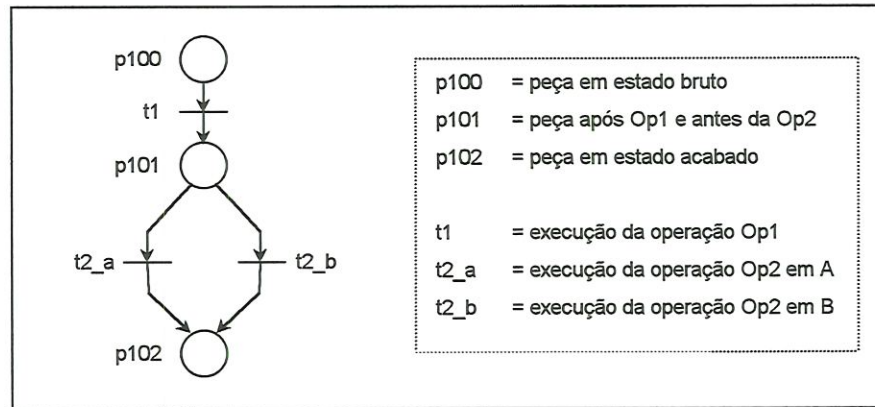


FIGURA 5.13 - Modelo de uma etapa de um processo alternativo de fabricação.

Nessa figura há a indicação de um estado inicial de “peça bruta”, passando por duas operações e finalizando com o estado “peça acabada”.

No caso específico desse modelo, os nós da PN, componentes do “Módulo Processos”, que têm uma ligação com outros módulos do modelo do sistema são as transições que descrevem uma operação de transformação da peça.

Esses elementos (nós) já foram contemplados no módulo que descreve o funcionamento das estações de trabalho, como pode ser verificado no modelo de estações (figura 5.3 do item 5.1 desse capítulo), onde há uma indicação de “execução de operação”.

5.5. O SISTEMA E SEU MODELO FINAL

O Sistema Automatizado de Manufatura deverá ter um modelo representativo de seu comportamento obtido a partir dos módulos de seus componentes (estações, processo, AGVs e rotas).

A maneira como a montagem do sistema será realizada pode ser exemplificada através da descrição da associação de dois dos módulos anteriormente descritos, ou seja, através, por exemplo, da associação entre estações de trabalho e AGVs.

Entretanto, para uma certificação da construção do modelo geral do sistema, validando os modelos de módulos apresentados, serão mostradas as associações entre todos os quatro módulos.

5.5.1. Associação entre Modelo de Estação e de AGV

Entre uma estação e um AGV ocorre uma carga e descarga de peças, portanto os modelos dos módulos dos objetos têm como elementos de associação os lugares e transições envolvidos nessa troca.

A figura 5.14 mostra o modelo resultante da associação dos modelos de estação e de AGV, ambos com “buffer” para três peças. Os lugares e transições receberam o mesmo índice para facilitar a interpretação, entretanto utilizou-se um caracter apóstrofe (') para identificar os elementos relativos ao AGV.

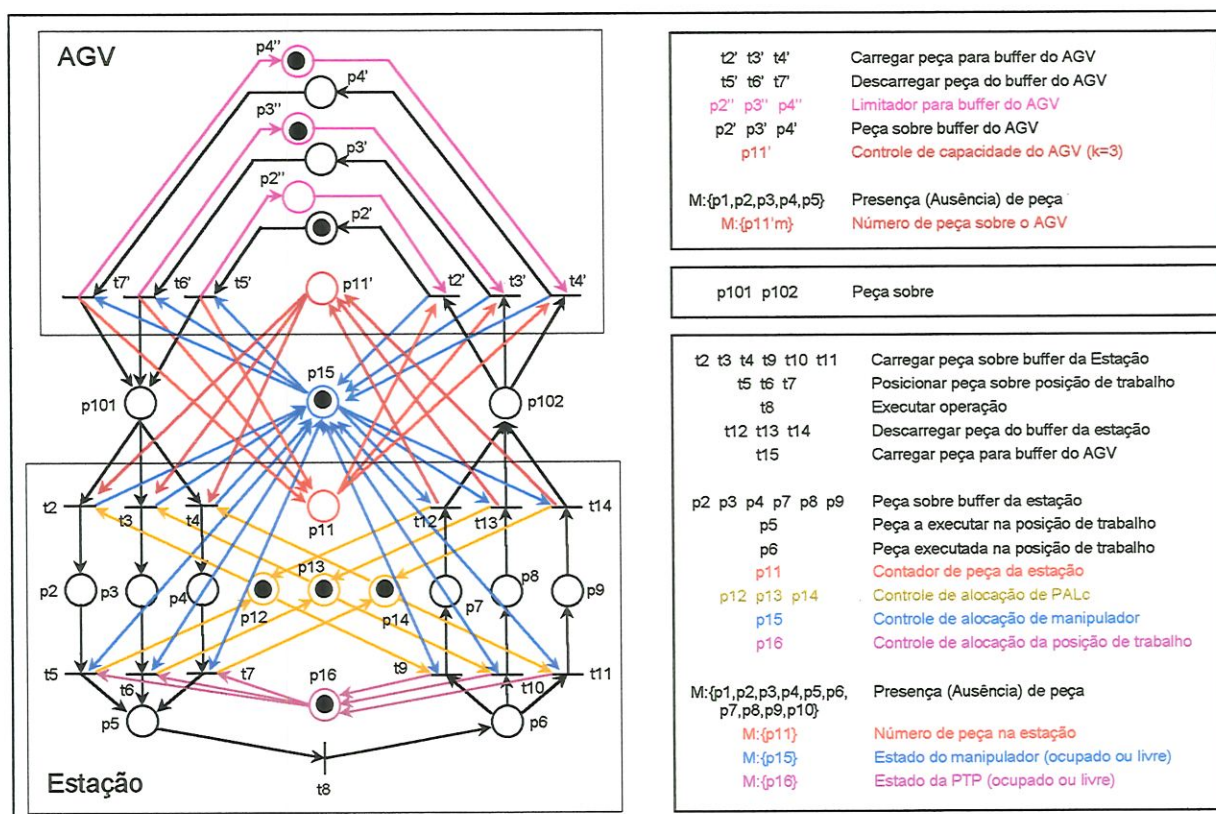


FIGURA 5.14 - Modelo em PN representando a associação de uma estação e um AGV, ambos com “buffer” para três peças.

A associação foi efetuada entre os lugares p_{vl} e p_{bl} e entre p_{bu} e p_{vu} . A estratégia de associação entre os modelos baseia-se em unir as pré e pós-condições de controle das transições dos modelos (sem os lugares virtuais) entre os buffers dos objetos.

Como exemplo, observe que o p_{ll} e p_{ll}' atuam sobre as transições da outra entidade. Isto é, esses lugares são “decrementados” somente quando a peça chega ao buffer destino, ou “incrementado” logo que o manipulador retira a peça da origem.

Outro exemplo é o estado do manipulador representado por p_{l5} . Uma peça só pode ser retirada se houver peça no AGV e o manipulador estiver livre.

A figura 5.15 ilustra uma síntese da associação entre os principais lugares do “Módulo Estação” e do “Módulo AGV”, ou seja mostra os lugares representativos de posição de peça.

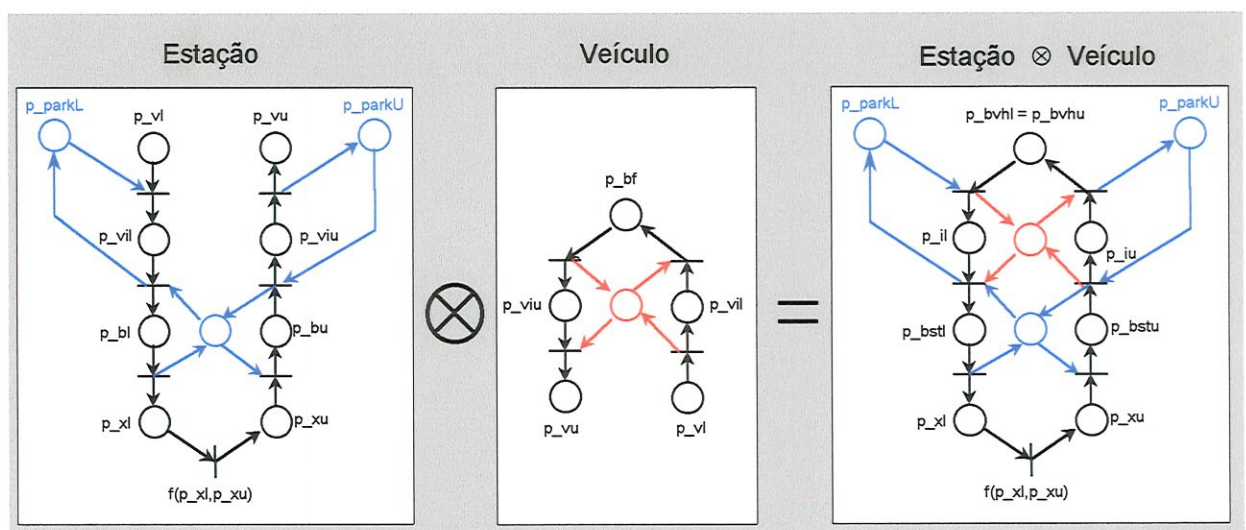


FIGURA 5.15 - Modelo simplificado da associação entre Estação e AGV.

Além dos elementos conhecidos, outros dois lugares foram acrescentados (p_{parkL} e p_{parkU}) e serão utilizados para a associação do “Módulo Estação” com o modelo de rotas.

5.5.2. Associação entre Modelo de Estação e de Processo

A associação entre os modelos de estação e de processo é uma tarefa sem grande complexidade porém bastante trabalhosa. Para que essa associação seja feita, como já comentado anteriormente, leva-se em consideração as transições indicativas de execução de operação presentes em ambos os módulos. Essas transições são comuns aos dois módulos, uma vez que representam a mesma ação.

Para exemplificação da associação, pode-se tomar como exemplo uma única operação de transformação dentro de um processo de fabricação, e a respectiva operação de carga e descarga em uma estação.

O modelo resultante da associação dos dois módulos pode ser observada na figura 5.16.

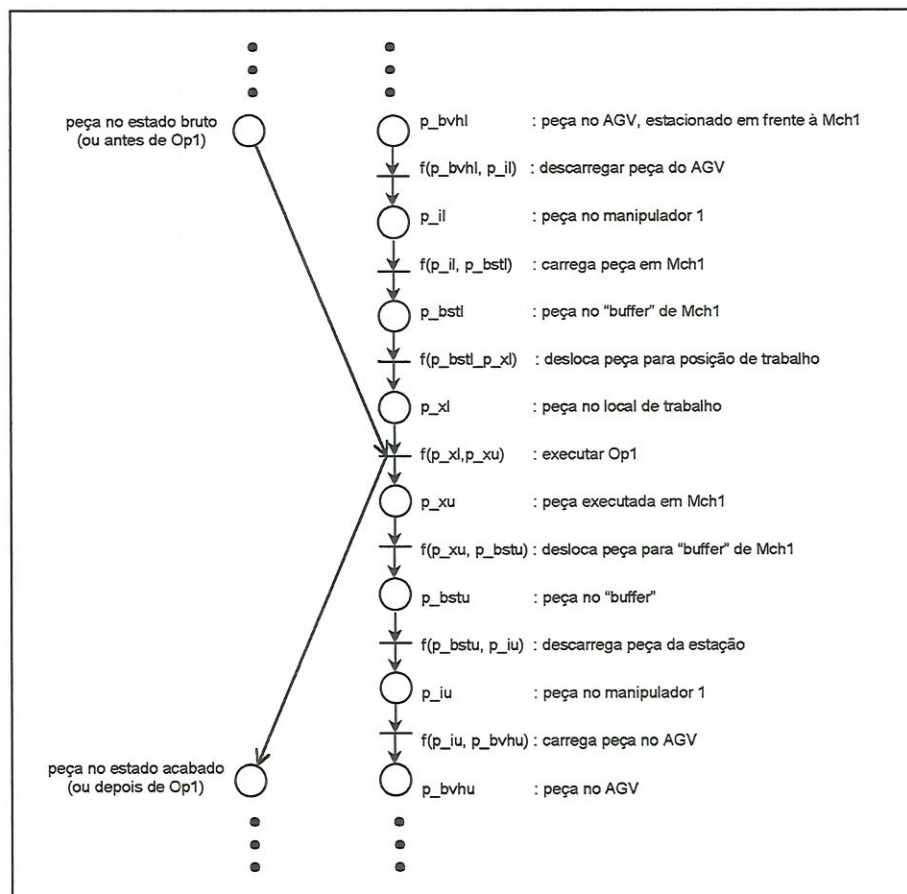


FIGURA 5.16 - Associação entre os modelos de estação e de processos.

Nesse modelo pode-se observar que, uma vez que a peça esteja no estado imediatamente anterior à execução operação de transformação $Op1$, basta que a peça seja descarregada do veículo e transportada até o ponto de trabalho da estação, para que a operação possa ser executada.

Logo após isso, a peça já estará no estado imediatamente posterior à execução da operação $Op1$, e deverá ser carregada novamente no veículo para que possa ser enviada à próxima estação.

5.5.3. Associação entre Modelo de Rotas e o Modelo Associado de Estação e AGV

Considerando-se o modelo de rotas (figura 5.10 do item 5.3 desse capítulo) os elementos de associação com os outros módulos são os lugares de parada dos veículos em frente às estações. Esse pontos são posições de carga e descarga de peça entre veículos e estações.

No modelo de rotas, os lugares estão indicados por PLU_{in} , PLU_{out} , $PMch1$, $PMch2$, $PMch3$, $PMch4$, $PMch5$ e $PMch6$, que podem ser substituídos por dois lugares cada, representando um ponto de carga (p_{parkL}) e um ponto de descarga (p_{parkU}).

Uma pequena alteração no modelo pode ser facilmente verificada, observando-se a figura 5.17, que mostra apenas um trecho do modelo de rotas alterado.

Considerando-se também o modelo simplificado de associação entre estação e AGV (figura 5.15, do item 5.5.1 desse capítulo) observa-se que a associação pode ser facilmente realizada, uma vez que os nós de “ligação” são lugares com a mesma descrição em ambos os módulos, ou seja, são os lugares p_{parkL} e p_{parkU} .

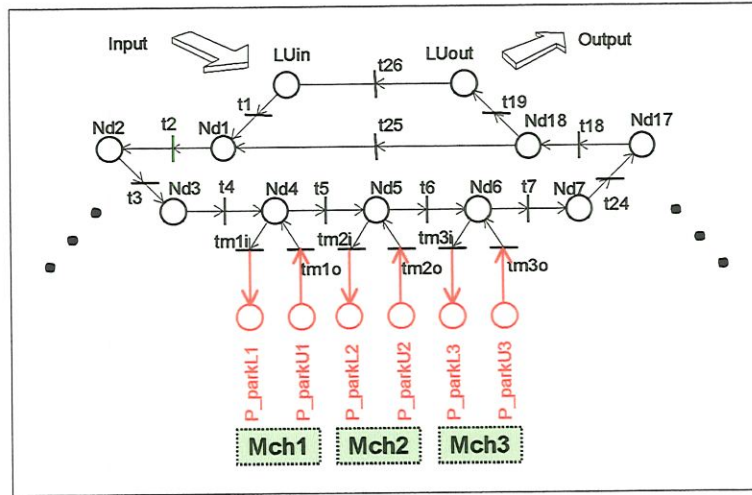


FIGURA 5.17 - Trecho do modelo de rotas, com descrição de pontos de carga e de descarga de peças.

O modelo resultante, agora contemplando estação, veículo e rota, pode ser visualizado na figura 5.18, que mostra apenas uma parte do modelo, relativo a um trecho do modelo de rota.

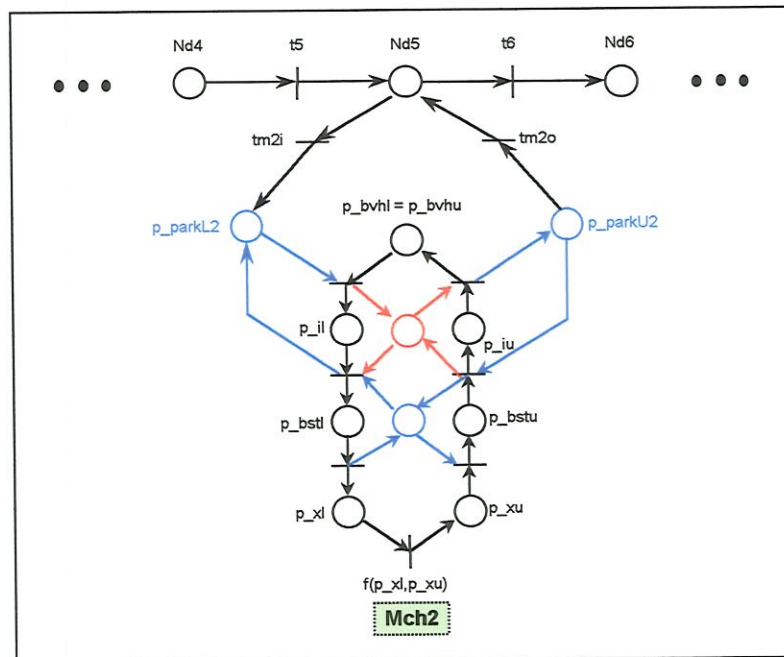


FIGURA 5.18 - Modelo simplificado, representante da associação entre estação, veículo e rota, para um trecho da rota. (Montado a partir das figuras 5.15 e 5.17)

5.5.4. Modelo Geral do Sistema

Uma vez elaborado o modelo anterior, que contempla estação, veículo e rota, basta associá-lo ao modelo de processo de fabricação para se obter o modelo geral do sistema.

Considerando-se como exemplo, um trecho de rota e um processo que passa por apenas duas estações de trabalho, pode-se montar o modelo final, conforme pode ser observado na figura 5.19.

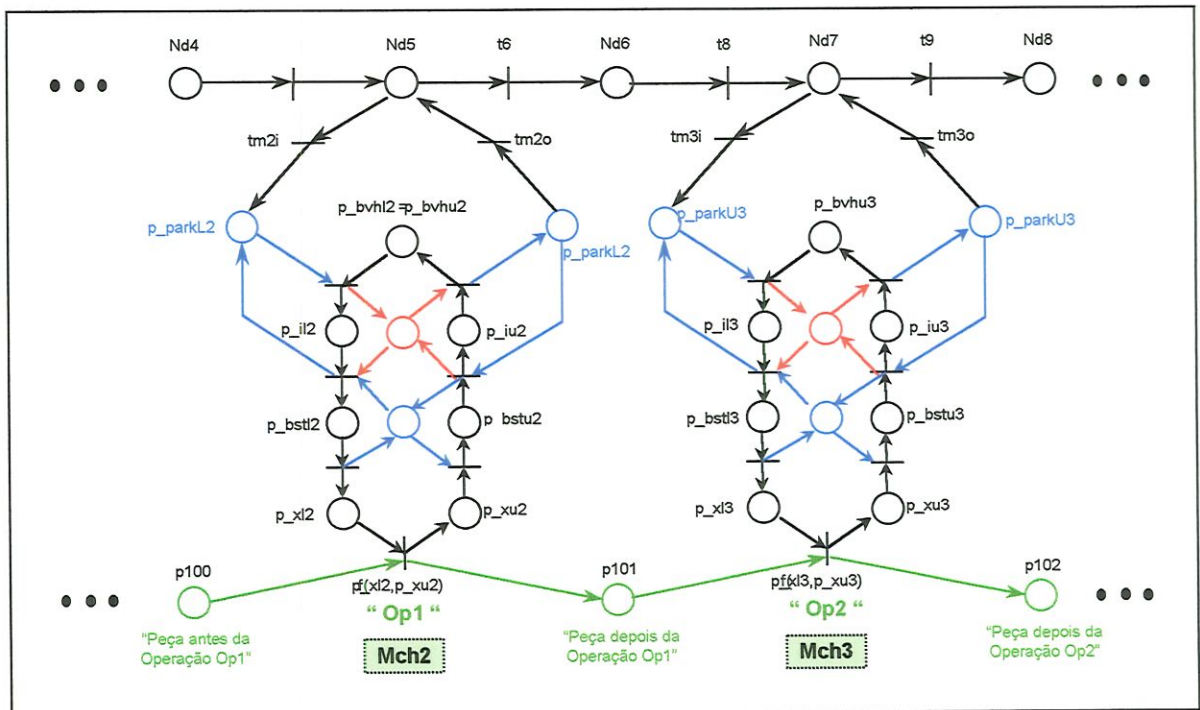


FIGURA 5.19 - Modelo associando os quatro módulos (estação, veículo, rotas e processo, para um trecho de rota.

Nessa figura pode-se observar que as duas operações do processo são executadas em duas estações consecutivas. Isso foi assim escolhido nesse exemplo, para que a representação gráfica pudesse ser facilmente visualizada. Certamente não há problemas caso uma seqüência diferente de operações seja escolhida.

5.4. Considerações sobre associação de módulos

Uma vez descritas as características de cada um dos módulos e, principalmente considerando-se os elementos de associação, pode-se identificar alguns tipos de associações específicos, como por exemplo, entre dois lugares, sendo um de cada módulo, ou ainda entre duas transições, ou ainda entre um lugar e duas transições de um módulo e um lugar e duas transições de outro, e assim por diante.

Avaliando-se as possíveis formas de associação, até aqui identificadas, pode-se descrever um método de montagem do modelo geral. Ou seja, uma vez conhecidas as possíveis “formas de ligação” entre os modelos, pode-se gerar o modelo final utilizando-se uma sistemática pré-estabelecida.

MÉTODO DE ASSOCIAÇÃO DOS MÓDULOS DO SISTEMA

A metodologia de modelagem proposta nesse trabalho se inicia na modelagem de módulos de elementos de um sistema, baseado no processo de fabricação, ou mais detalhadamente, considerando todos os locais por onde uma peça passará.

A construção dos módulos considerou todos esses pontos mas, além disso, deve-se salientar que também foram descritos os nós de associação para a obtenção do modelo geral.

Esses nós comuns constituem a base para a aplicação de um método de associação entre os módulos.

O método de associação proposto, deve levar em consideração alguns pontos (comentados a seguir), de maneira a permitir a descrição de uma sistemática, tanto para a elaboração dos módulos, como para a associação dos mesmos.

Nesse método, deve-se considerar inicialmente os nós de associação entre os módulos, no momento de suas construções, ou seja, deve-se ter definidos em cada um dos módulos, os lugares e transições comuns entre si, conforme foi abordado no capítulo anterior.

Ainda, para que se possa definir uma sistemática de associação generalizada entre os módulos, propõe-se que esses nós comuns sejam referido como “virtuais”, inicialmente apenas para distinguí-los dos demais.

Posteriormente deverá ser mostrado que, além da caracterização desses elementos na rede como distintos, o modelo associado entre dois ou mais módulos, deverá substituir esses nós “virtuais” por outros, a partir de então não sendo mais assim referidos.

Como se utiliza uma nova extensão de PN não proposta por outros autores, faz-se necessária então a sua descrição e validação.

A definição de Rede de Petri Lugar-Transição, até aqui utilizada para descrição dos módulos, é definida formalmente (Murata, 1989) como uma quintupla, $PN = (P, T, F, W, M_0)$, onde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ é um conjunto finito de lugares;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições;

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é um conjunto de arcos;

$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ são os pesos das funções;

$M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ é o estado inicial;

$P \cap T = \emptyset$ e $P \cup T \neq \emptyset$.

Uma estrutura de Rede de Petri sem uma marcação inicial é denotada por $N = (P, T, F, W)$. Uma PN com marcação inicial é denotada por (N, M_0) .

Define-se nesse trabalho uma Rede de Petri Virtual, formalmente, como sendo uma quintupla, $VPN = (vP, vT, vF, vW, vM_0)$ onde:

$vP = vP \cup P$, é um conjunto finito de lugares virtual;

$vT = vT \cup T$, é um conjunto finito de transições virtual;

$vF = vF \cup F$, é um conjunto finito de arcos virtual;

$vW: vF$, é o peso da função virtual;

$vM_0: vP \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ é o estado inicial virtual;

$vP = \{vp_{1+n}, vp_{2+n}, \dots, vp_p\}$ é o conjunto finito de lugares virtuais;

$vT = \{vt_{1+m}, vt_{2+m}, \dots, vt_q\}$ é o conjunto finito de transições virtuais;

$vF \subseteq (vP \times vT) \cup (vT \times vP) \cup (P \times vT) \cup (vT \times P) \cup (vP \times T) \cup (T \times vP)$ é o conjunto de arcos virtuais;

$vW: vF \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ é a função peso virtual;

$vM_0: vP \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ é o estado inicial virtual;

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ é um conjunto finito de lugares;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições;

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é um conjunto de arcos;

$vP \cup vT \neq \emptyset, vP \cup T \neq \emptyset, P \cup vT \neq \emptyset, P \cup T \neq \emptyset;$

$vP \cap vT = P \cap vT = vP \cap T = P \cap T = \emptyset$.

Além disso, considera-se:

- $\bullet p_i$ = conjunto de transições de entrada do lugar p_i .
- $\bullet vp_j$ = conjunto de transições de entrada do lugar virtual vp_j .
- $v(\bullet vp_j)$ = conjunto de transições virtuais de entrada do lugar virtual vp_j .
- $v(\bullet p_i)$ = conjunto de transições virtuais de entrada do lugar p_i .
- $p_i \bullet$ = conjunto de transições de saída do lugar p_i
- $vp_j \bullet$ = conjunto de transições de saída do lugar virtual vp_j
- $v(vp_j \bullet)$ = conjunto de transições virtuais de saída do lugar virtual vp_j
- $v(p_i \bullet)$ = conjunto de transições virtuais de saída do lugar p_i

Esse conjunto de nós pode ser visto na figura 6.1.

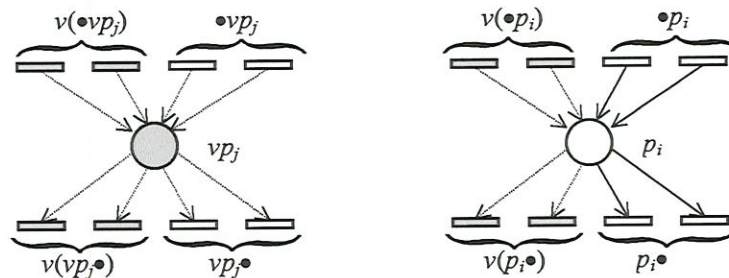


FIGURA 6.1 – Representação de nós (lugares e transições) numa PN Virtual

Além disso, considera-se:

- $\bullet t_i$ = conjunto de lugares de entrada da transição t_i .
- $\bullet vt_j$ = conjunto de lugares de entrada da transição virtual vt_j .
- $v(\bullet vt_j)$ = conjunto de lugares virtuais de entrada da transição virtual vt_j .
- $v(\bullet t_i)$ = conjunto de lugares virtuais de entrada da transição t_i .
- $t_i \bullet$ = conjunto de lugares de saída da transição t_i
- $vt_j \bullet$ = conjunto de lugares de saída da transição virtual vt_j
- $v(vt_j \bullet)$ = conjunto de lugares virtuais de saída da transição virtual vt_j
- $v(t_i \bullet)$ = conjunto de lugares virtuais de saída da transição t_i

Uma vez definida a Rede de Petri Virtual, essa rede é usada na construção de cada módulo.

Então cada módulo é uma PN com alguns elementos virtuais (lugares, transições e arcos). Os elementos da rede, para identificar o módulo a que pertence, usa para um lugar i , a notação p_{alj} e, para uma transição, a notação t_{alj} .

A figura 6.2 mostra a forma de representação desses elementos, com uma pequena alteração.

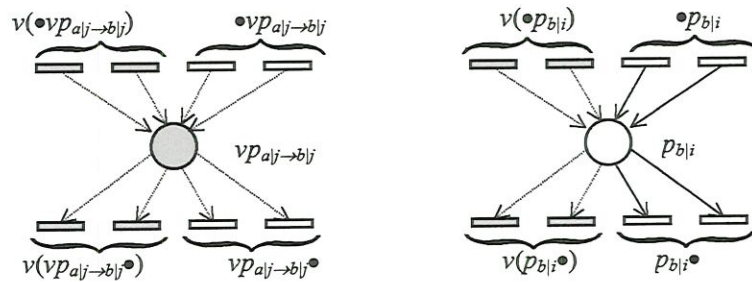


FIGURA 6.2 - Representação de módulos com elementos virtuais

A notação $vp_{alj \rightarrow bj}$ é uma forma de representação de um lugar virtual vp_i pertencente ao módulo vPN_a e esse lugar tem um alvo p_i (com a mesma identificação) pertencente ao módulo vPN_b .

Assim, o nó virtual (lugar e transição) é aquele que tem um nó alvo em outro módulo, ou seja, o nó virtual é aquele que tem uma representação em um outro módulo do modelo geral, indicando representar a mesma situação (lugar ou transição).

Dessa forma, o $v(\bullet vp_{alj \rightarrow bj})$ é um conjunto de transições virtuais de entrada que têm alvos mostrados a seguir:

$$\begin{aligned}
 v(\bullet vp_{alj \rightarrow bj})_{a \rightarrow w} &= (vt_{alj \rightarrow clj}, vt_{alj \rightarrow dlj}, \dots, vt_{al|k \rightarrow e|k}) = \\
 &= v(\bullet vp_{alj \rightarrow bj})_{a \rightarrow b} \cup v(\bullet vp_{alj \rightarrow bj})_{a \rightarrow (w-b)}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

onde:

w = conjunto de elementos alvo para montagem.

A montagem de dois módulos é realizada considerando-se os nós virtuais. Todos os nós virtuais que são alvos uns dos outros, ou que têm alvos em outros elementos serão representados por um único novo nó no modelo geral. Os demais nós permanecerão da maneira como eram representados.

De uma maneira geral deve-se associar os nós, considerando-se uma associação por vez, ou seja, associando-se dois módulos por vez até que se obtenha a associação entre todos os módulos do modelo.

O procedimento é “unir” a representação de dois nós criando-se um novo nó que indique sua origem e de tal maneira que suas entradas e saídas (lugares ou transições) sejam preservadas.

As possíveis situações de associação podem ser descritas na forma de uma equação para implementação de um algoritmo de associação.

Uma primeira situação é a associação entre um lugar virtual e um lugar alvo (não virtual) que é associado da seguinte maneira:

$$(v\rho_{a|j \rightarrow b|j}) \oplus (\rho_{b|j}) = (v\rho_{a|j \rightarrow b|j}, \rho_{ab|j}) \quad (6.2)$$

onde:

$v\rho_{a|j \rightarrow b|j}$ = lugar virtual ρ_j do módulo a que tem um alvo ρ_j em um módulo b .

$\rho_{b|j}$ = lugar do módulo b . Esse lugar é o alvo de $v\rho_{a|j}$.

$\rho_{ab|j}$ = lugar resultante da associação de ρ_j .

$$\begin{aligned} \bullet\rho_{ab|j} = & \bullet v\rho_{a|j \rightarrow b|j} \cup \bullet\rho_{b|j} \cup v(\bullet\rho_{b|j}) \cup v(\bullet v\rho_{a|j \rightarrow b|j})_{a \rightarrow (w-b)} \cup \\ & \cup (v(\bullet v\rho_{a|j})_{a \rightarrow b} \oplus v(\bullet v\rho_{b|j})_{b \rightarrow a}) \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \rho_{ab|j}^\bullet = & v\rho_{a|j \rightarrow b|j}^\bullet \cup \rho_{b|j}^\bullet \cup v(\rho_{b|j}^\bullet) \cup v(v\rho_{a|j \rightarrow b|j}^\bullet)_{a \rightarrow (w-b)} \cup \\ & \cup (v(v\rho_{a|j}^\bullet)_{a \rightarrow b} \oplus v(v\rho_{b|j}^\bullet)_{b \rightarrow a}) \end{aligned} \quad (6.4)$$

Pode-se mostrar graficamente essas associações, prevendo-se algumas possíveis situações, de acordo com o apresentado na figura 6.3.

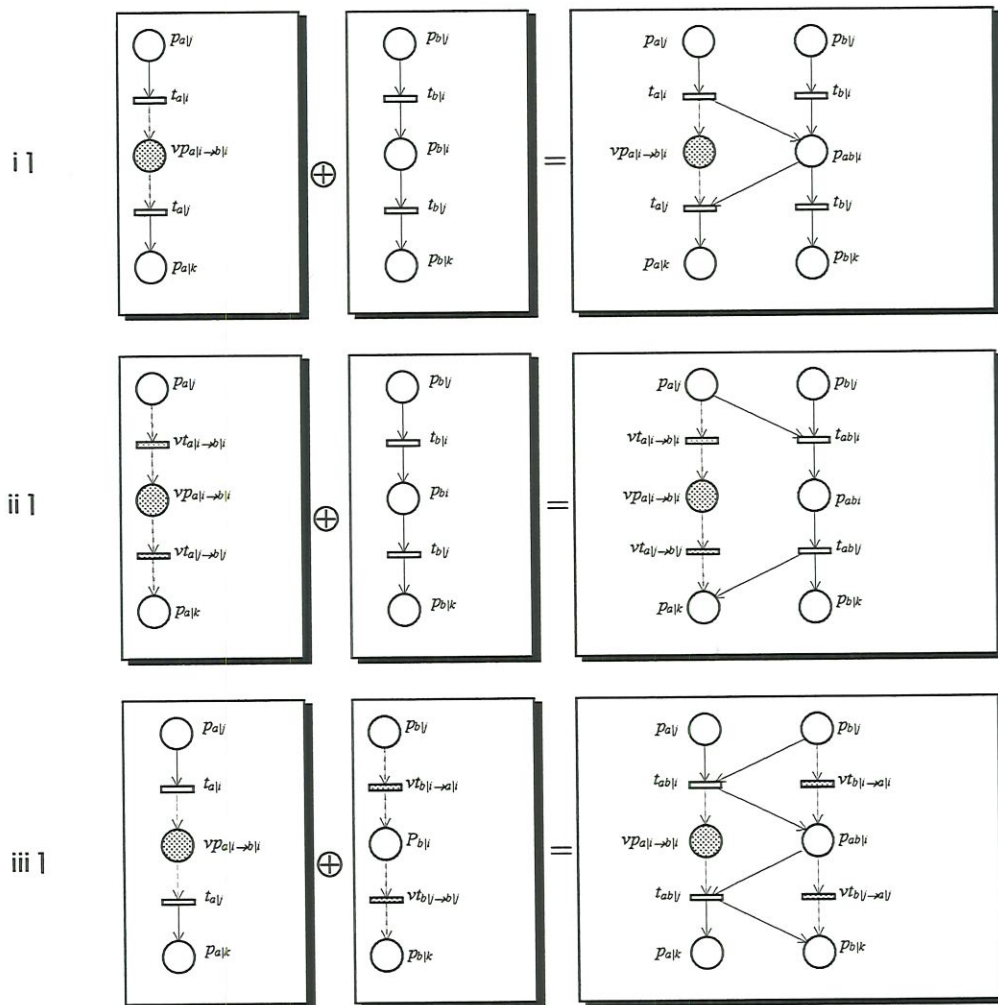


FIGURA 6.3 - Exemplos de associação entre módulos: i] um lugar virtual do módulo a, com alvo em um lugar (não virtual) do módulo b; ii] um lugar virtual e duas transições virtuais de um módulo a, com alvo em um lugar e duas transições de um módulo b; iii] um lugar virtual de um módulo a, com um alvo em um módulo b, e duas transições virtuais de um módulo b, com alvos em um módulo a.

Cabe destacar que, na figura representativa da associação dos módulos, embora continue sendo apresentados os nós virtuais, eles não fazem parte do modelo associado. Eles estão colocados nas figuras, apenas com o objetivo de facilitar a interpretação da associação.

Portanto, os modelos associados devem ter esses nós excluídos, assim como os arcos de entrada e saída a eles conectados.

Além dessas possibilidades, um outro tipo de associação pode ser exemplificado: a associação de dois nós virtuais.

Dois nós virtuais também podem ser associados se eles são alvo de um outro. A associação de dois nós virtuais resulta em um novo nó.

O lugar virtual para um lugar virtual alvo é montado da seguinte maneira:

$$(vp_{a|i \rightarrow b|i}) \oplus (vp_{b|i \rightarrow a|i}) = (vp_{a|i \rightarrow b|i}, vp_{b|i \rightarrow a|i}, p_{ab|i}) \quad (6.5)$$

onde:

$vp_{a|i \rightarrow b|i}$ = lugar virtual p_i do módulo a de tipo A que tem um alvo p_i em um módulo b de tipo B .

$vp_{b|i \rightarrow a|i}$ = lugar virtual p_i do módulo b de tipo B que tem um alvo p_i em um módulo a de tipo A .

$p_{ab|i}$ = novo lugar resultante da associação de p_i .

$$\begin{aligned} \bullet p_{ab|i} = & \bullet vp_{a|i \rightarrow b|i} \cup \bullet vp_{b|i \rightarrow a|i} \cup v(\bullet vp_{a|i \rightarrow b|i})_{a \rightarrow (w-b)} \cup v(\bullet vp_{b|i \rightarrow a|i})_{b \rightarrow (w-a)} \cup \\ & v(\bullet vp_{a|i \rightarrow b|i})_{ab \rightarrow b} \cup v(\bullet vp_{b|i \rightarrow a|i})_{ab \rightarrow a} \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} p_{ab|i}^\bullet = & vp_{a|i \rightarrow b|i}^\bullet \cup vp_{b|i \rightarrow a|i}^\bullet \cup v(vp_{a|i \rightarrow b|i}^\bullet)_{a \rightarrow (w-b)} \cup v(vp_{b|i \rightarrow a|i}^\bullet)_{b \rightarrow (w-a)} \cup \\ & v(vp_{a|i \rightarrow b|i}^\bullet)_{ab \rightarrow b} \cup v(vp_{b|i \rightarrow a|i}^\bullet)_{ab \rightarrow a} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Da mesma maneira como foi mostrado anteriormente, pode-se apresentar graficamente essas associações, prevendo-se algumas possíveis situações, de acordo com o apresentado na figura 6.4.

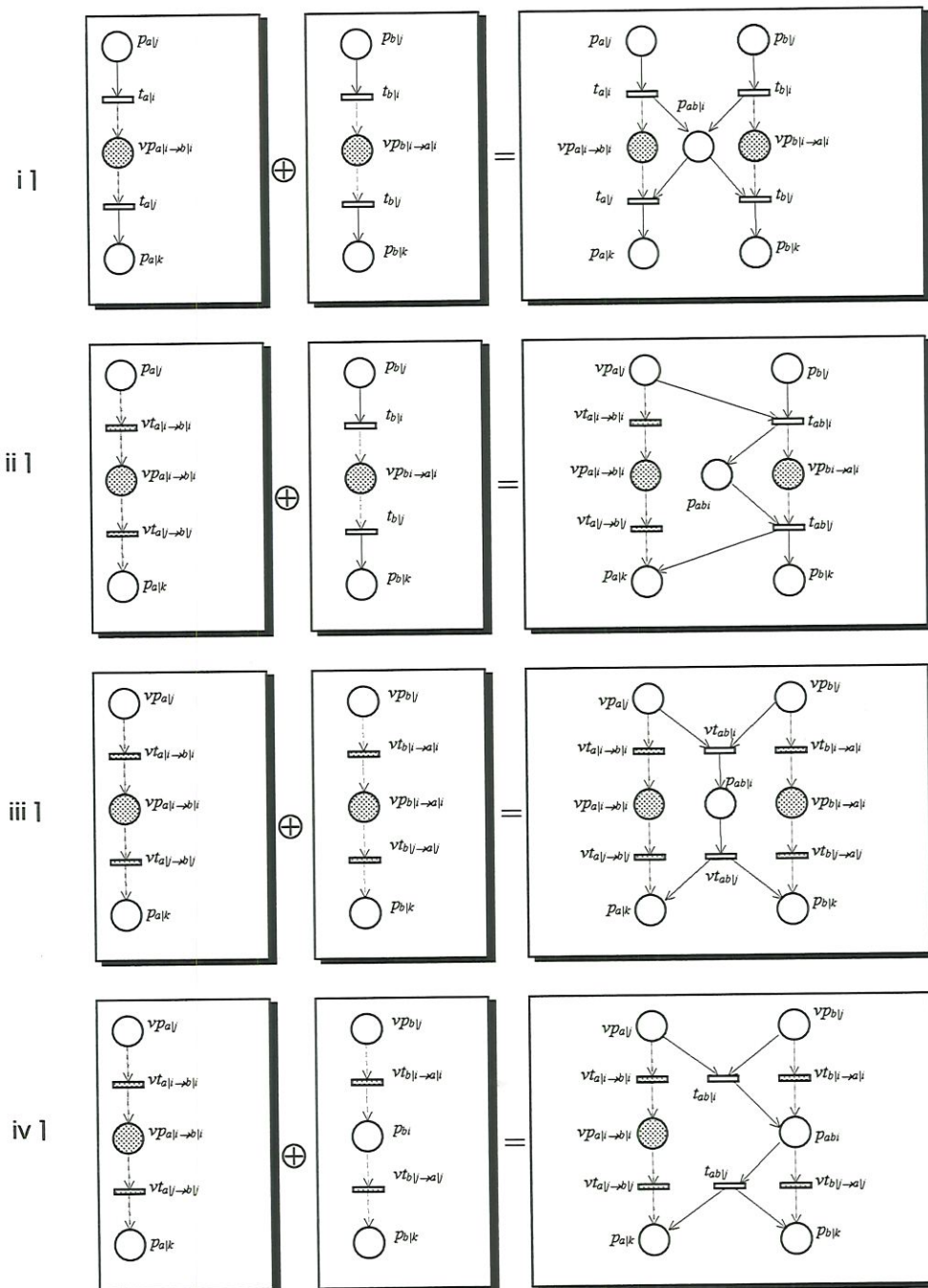


FIGURA 6.4 - Exemplos de associação entre módulos: i] um lugar virtual do módulo a, com alvo em um lugar virtual do módulo b; ii] um lugar virtual e duas transições virtuais de um módulo a, com alvo em um lugar virtual e duas transições (não virtuais) de um módulo b; iii] um lugar virtual e duas transições virtuais de um módulo a, com alvo em um lugar virtual e duas transições virtuais de um módulo b; iv] duas transições virtuais e um lugar virtual de um módulo a, com alvo em duas transições virtuais e um lugar (não virtual) em um módulo b.

A apresentação formal da montagem de dois módulos $VPN_a \oplus VPN_b$ é também uma quintupla $VPN_{ab} = (VP_{ab}, VT_{ab}, VF_{ab}, VW_{ab}, VM_{0ab})$ onde:

$$VP_{ab} = P_{va \rightarrow vb} \cup P_{vb \rightarrow va} \cup VP_{va \rightarrow vb} \cup VP_{vb \rightarrow va} \cup VP_a \cup VP_b$$

$$VT_{ab} = T_{va \rightarrow vb} \cup T_{vb \rightarrow va} \cup VT_{va \rightarrow vb} \cup VT_{vb \rightarrow va} \cup VT_a \cup VT_b$$

$$VF_{ab} = VF_{ab} \cup F_{ab}$$

$$VW_{ab} : VF_{ab}$$

$VM_{0ab} : VP_{ab} \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ é o estado inicial virtual;

$$VP_{ab} \cup VT_{ab} \neq \emptyset,$$

$VP = \{vp_{1+n}, vp_{2+n}, \dots, vp_p\}$ é o conjunto finito de lugares virtuais,

$VT = \{vt_{1+m}, vt_{2+m}, \dots, vt_q\}$ é o conjunto finito de transições virtuais,

$$VF \subseteq (VP \times VT) \cup (VT \times VP) \cup (P \times VT) \cup (VT \times P) \cup (VP \times T) \cup (T \times VP) \text{ é}$$

o conjunto de arcos virtuais,

$VW : VF \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ é o peso da função,

$$VP \cap VT = P \cap VT = VP \cap T = \emptyset$$

$P_{va \rightarrow vb} \oplus P_{vb \rightarrow va} =$ conjunto de novos lugares.

EXEMPLO DE MODELAGEM DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE MANUFATURA

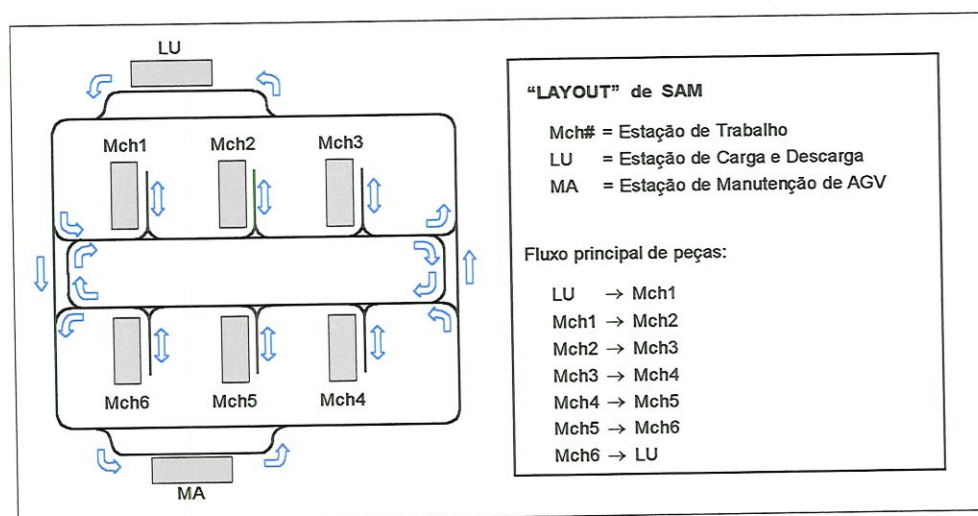
Nos capítulos anteriores, mostrou-se uma metodologia de modelagem de Sistemas Automatizados de Manufatura (SAM), utilizando-se PN Virtual e uma abordagem de modelagem por construção modelar, baseada no processo de fabricação.

Nesse capítulo, será utilizado um exemplo de SAM para apresentar a aplicação da metodologia, passo a passo.

Alguns dos modelos aqui utilizados foram construídos nos capítulos anteriores, quando foi mostrada a abordagem de modelagem para cada um dos elementos de SAMs.

7.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema tomado como exemplo (Morandin e Inamasu, 1995; Inamasu, 1995) é um Sistema Flexível de Manufatura composto por seis estações de trabalho, uma estação de carga e descarga, uma estação de manutenção de AGVs e sistema de transporte baseado em dois AGVs. O “layout” desse sistema já foi apresentado no capítulo 5, figura 5.9



CÓPIA DA FIGURA 5.9 - Exemplo de um “layout” de Sistema Automatizado de Manufatura

Nesse sistema deve-se trabalhar numa peça bruta, até a obtenção de um produto ou peça acabada, obedecendo-se a um plano de processo específico.

7.1.1. O Processo de Fabricação

O plano de processo exemplo define uma seqüência de fabricação, para obtenção do produto, que passa por três estações, partindo da estação de carga e finalizando na estação de descarga.

Portanto, para execução das tarefas, deve-se iniciar por uma estação A, depois por uma estação B e finalmente por uma C.

Uma restrição exemplo aqui colocada é que as duas primeiras operações devem ser executadas nas estações Mch1 e Mch2 (do “layout”) nessa seqüência, ou então nas estações Mch3 e Mch4, também na seqüência, e a terceira operação pode ser executada em qualquer uma das estações Mch5 ou Mch6.

Isso significa que, caso a primeira operação seja executada em Mch1, a segunda será necessariamente em Mch2. Caso primeira operação seja executada em Mch3, a segunda será necessariamente em Mch4. A última operação é de livre opção entre Mch5 e Mch6.

7.2. ELABORAÇÃO DOS MÓDULOS

O primeiro passo para elaboração do modelo geral é a construção dos módulos de cada um dos elementos componentes do sistema: processo de fabricação, AGVs, rotas e estações.

7.2.1. Módulo do Plano de Processos

O Módulo Processo, deve ser elaborado considerando as possíveis alternativas de obtenção da seqüência de operações. Para isso, deve-se elaborar um grafo com nós representando as estações, e ligá-los observando-se a seqüência e a restrição comentada no item 7.1.1.

O modelo em PN que descreve o plano de processos pode ser visto na figura 7.1.

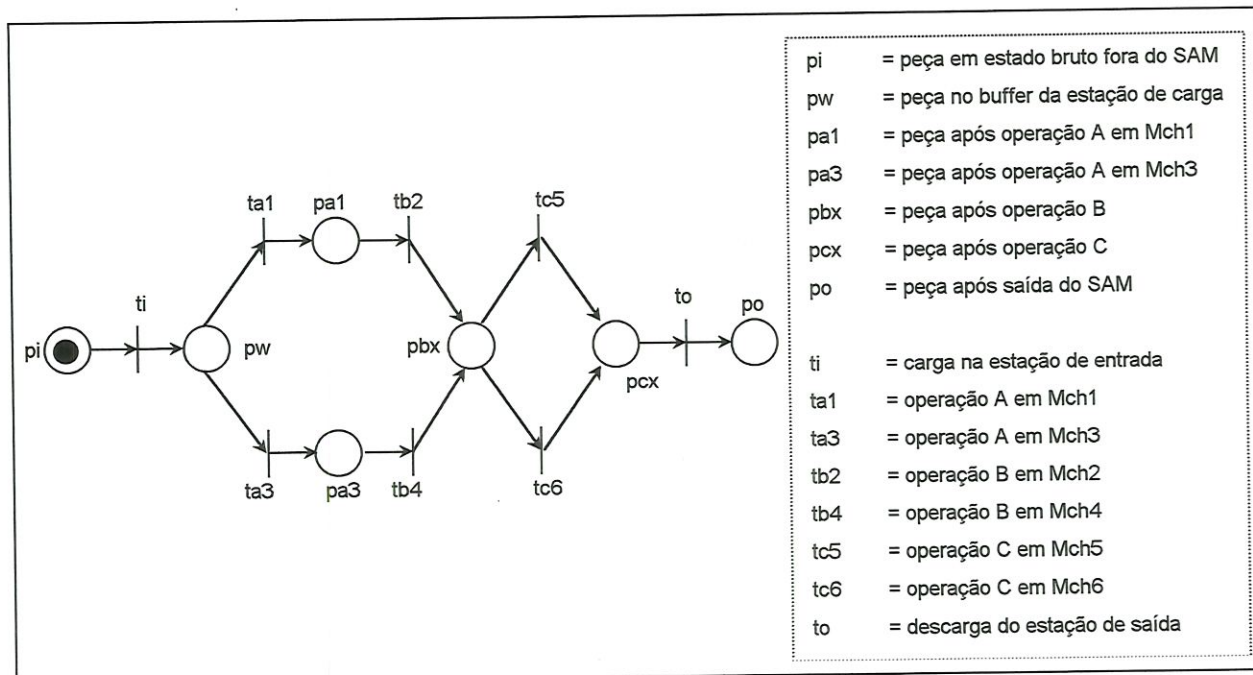


Figura 7.1 – Modelo de Processo Alternativo

Esse modelo obedece ao plano de processo descrito anteriormente e, para que se possa posteriormente aplicar o método de associação, faz-se necessária a indicação dos nós comuns com outros módulos.

Os lugares pw, pa1, pa3, pbx e pcx representam estados tecnológicos da peça e os lugares pi e po representam respectivamente, a peça antes de entrar no sistema e a mesma peça após descarregada na estação de saída.

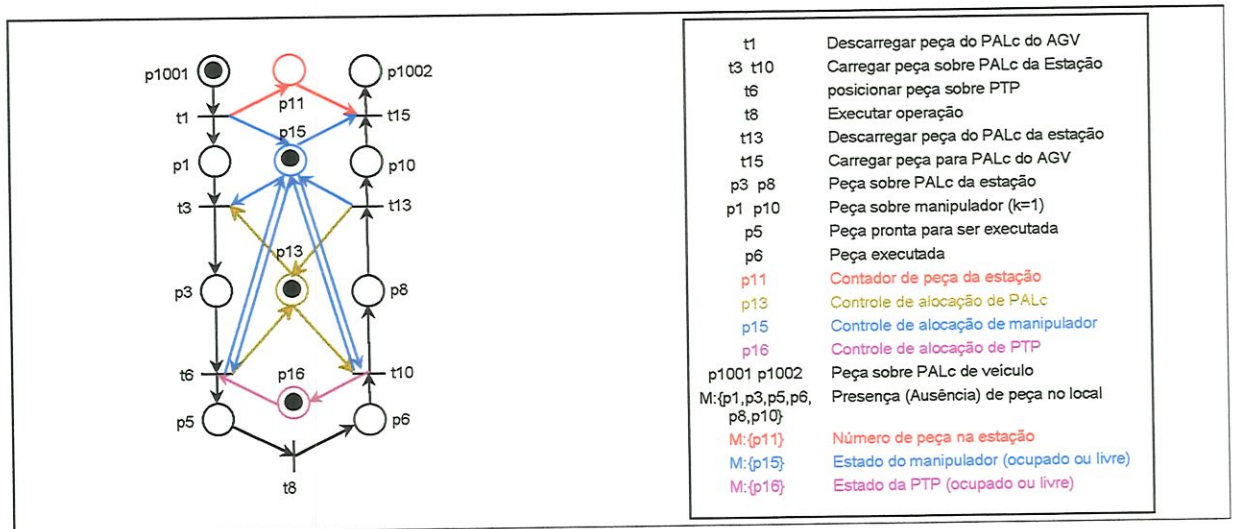
As transições ti e to indicam a movimentação de entrada e saída da peça no sistema e as transições ta1, ta3, tb2, tb4, tc5 e tc6 indicam operações de transformação da peça nas estações de trabalho.

Assim, todas as transições terão uma transição correspondente em outros módulos (estação de entrada e saída e estações de trabalho), e somente os lugares de entrada e saída é que terão o seu correspondente em outros módulos (estação de entrada e saída).

Esses nós serão então considerados como virtuais com alvo nos pares dos outros módulos.

7.2.2. Módulo de Estações

As estações de trabalho, assim como as estações de entrada e saída, usarão como modelo um módulo denominado “Módulo Estação” e que segue os mesmos padrões estabelecidos no capítulo 5 e indicados na figura 5.4

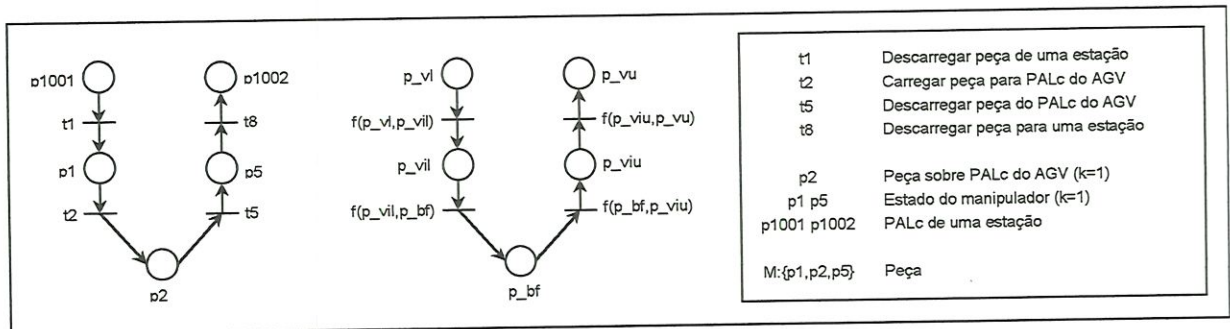


CÓPIA DA FIGURA 5.4 - Modelo em PN de uma estação de trabalho para apenas uma peça, com elementos de controle.

Os nós com associação ou alvo em outro modelo são os lugares p1001, p1002, p1, p10, p3 e p8 e as transições t1, t3, t13 e t15, como mencionado no capítulo 5.

7.2.3. Módulo Veículo

O Módulo Veículo a ser considerado é o apresentado no capítulo 5, cujo modelo é apresentado na figura 5.7.



CÓPIA DA FIGURA 5.7 - Modelo de um AGV para representar posicionamento de uma peça.

Nesse módulo, os nós de associação com alvos no Módulo Estação, como comentado no capítulo 5 são: os lugares p1001, p1002, p1 e p2 e as transições t1, t2, t5 e t8.

7.2.4. Módulo Rotas

O Módulo Rotas a ser considerado é o modelo apresentado na figura 5.12, uma vez que se usa dois AGVs para transporte e o “layout” é o mesmo apresentado no capítulo 5.

Entretanto uma pequena alteração deve ser considerada para se contemplar a associação desse módulo com os demais.

Essa alteração é a diferenciação entre os pontos de carga e descarga que, no modelo estão representados como comum, pois essa é a apresentação sugerida no capítulo 5 para associação com os módulos Estação e Veículo.

Tal diferenciação, ou detalhamento entre carga e descarga de peças na estação, foi contemplada no modelo apresentado na figura 5.17.

7.2.5. Outras Alterações nos Módulos de Modelos

Pode-se notar uma denominação similar de cada um dos nós de associação dos módulos, que servem para indicar os respectivos alvos porém, segundo a descrição

estabelecida no método de associação usando PN Virtual, cada um desses elementos deve sofrer uma alteração na denominação, descrevendo o módulo a que pertence e seu respectivo alvo.

Tome-se como exemplo o lugar p1001 que aparece no Módulo Estação e que também aparece no Módulo Veículo.

Considere-se um índice para cada um dos módulos, por exemplo: *E* para o módulo Estação, *A* para o Módulo Veículo, *R* para o Módulo Rotas e *P* para o Módulo Processo.

Pode-se então alterar a denominação do lugar p1001 do Módulo Estação para $VP_{E|1001 \rightarrow A|1001}$, que indica que é um lugar virtual de número 1001, pertencente ao módulo E e que tem um alvo no lugar 1001 do módulo A.

Também deve-se alterar a denominação do lugar p1001 do Módulo Veículo para $VP_{A|1001 \rightarrow E|1001}$, que indica que é um lugar virtual de número 1001, pertencente ao módulo A (veículo) e que tem um alvo no lugar 1001 do módulo E (estação).

Isso deve então ser estendido a todos os nós comuns, ou de associação citados anteriormente.

Uma vez isso realizado, pode-se utilizar o método de associação para construção do modelo geral.

7.3. ASSOCIAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS

A associação entre os módulos, seguindo-se o método apresentado no capítulo 6, utiliza as equações 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7, anteriormente descritas. Ou seja, para se obter o modelo associado, deve-se considerar dois ou mais nós alvos entre si, e criar um resultante que indica a sua associação, não havendo mais referência como nó virtual.

Tome-se como exemplo os lugares $VP_{A|1001 \rightarrow E|1001}$ e $VP_{E|1001 \rightarrow A|1001}$, que são alvo um do outro e que, após a associação, deixam de existir no modelo e cria-se um outro com denominação $P_{EA|1001}$.

Nesse novo lugar, suas pré e pós-condições serão todas as pré e pós-condições dos respectivos lugares que geraram essa associação.

7.3.1. Associação entre Módulo Estação e Módulo Veículo

A associação entre os Módulos Estação e Veículo foi discutida no capítulo 5, e o modelo final usado pode ser visto na figura 5.15.

7.3.2. Associação entre Módulo resultante (Estação \otimes Veículo) e Módulo Rotas

A associação entre o Módulo resultante (Estação \otimes Veículo) e Módulo Rotas também foi discutida no capítulo 5, e o modelo usado pode ser visto na figura 5.18. Embora na figura exista apenas a representação de um trecho da rota, a forma de associação resultante para os demais trechos tem exatamente a mesma forma.

Por isso, optou-se por deixar a apresentação completa quando a associação contemplar os quatro módulos.

7.3.2. Associação entre Módulo resultante (Estação \otimes Veículo \otimes Rotas) e Módulo Processo

A associação entre o Módulo resultante (Estação \otimes Veículo \otimes Rotas) e o Módulo Processo também foi discutida no capítulo 5, e o modelo usado pode ser visto na figura 5.19, onde se observa a associação que contempla um trecho de rota.

O Modelo Final do Sistema Automatizado de Manufatura pode ser visto na figura 7.2.

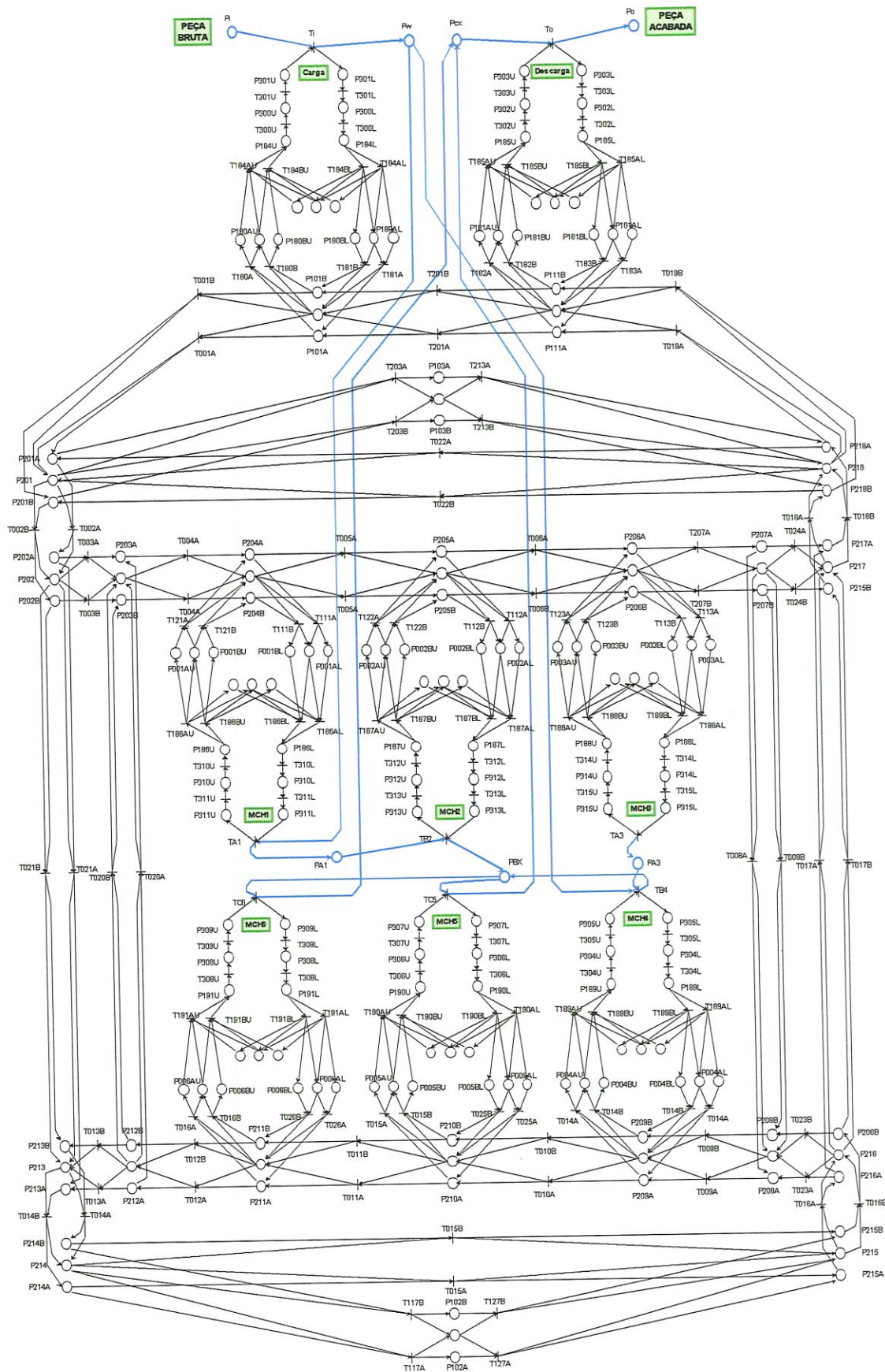


Figura 7.2 – Modelo final do Sistema Automatizado de Manufatura

7.4. TESTES E VALIDAÇÃO

Com base no Modelo Final obtido e também nas características dos módulos desenvolvidos, pode-se verificar a integridade do modelo, uma vez que todos as funções e estados que existiam originalmente nos módulos, continuam existindo; ainda que possam ter uma denominação ligeiramente diferente das originais, como resultado da aplicação do método de associação.

Como a PN resultante é uma PN Lugar-Transição, não contendo mais elementos virtuais, pode-se então empregar as técnicas de análise de PN para avaliar conflitos, vida, limitação, persistência, etc.

Além disso, realizou-se algumas simulações da PN mostrando que existe pelo menos um caminho possível, para obtenção da peça acabada, para cada uma das quatro possíveis seqüências de operações.

Esses caminhos podem ser referidos como funções lugar-a-lugar ou simplesmente como seqüências de transições que foram disparadas.

Observando-se o modelo final mostrado no anexo, pode-se verificar a existência de vários caminhos que indicam a transformação de uma peça bruta em uma peça acabada. Como exemplo, quatro dos caminhos encontrados são dados pelas seguintes seqüência de disparo de transição:

- **Seqüência 1:**

(desde a entrada, passando por Mch1, Mch2 e Mch5, até a saída, usando o AGV A)

ti – t301L – t300L – t184aL – t181a – t001a – t002a – t003a – t004a – t111a – t186aL – t310L – t311L – ta1 – t311U – t310U – t186aU – t121a – t005a – t112a – t187aL – t312L – t313L – tb2 – t313U – t312U – t187aU – t122a – t006a – t007a – t008a – t009a – t010a – t015a – t190aL – t306L – t307L – tc5 – t307U – t306U – t190aU – t025a – t011a – t012a – t020a – t004a – t005a – t006a – t007a – t024a – t018a – t019a – t182a – t185aU – t302U – t303U – to

▪ **Seqüência 2:**

(desde a entrada, passando por Mch3, Mch4 e Mch6, até a saída, usando o AGV A)

$t_i - t_{301L} - t_{300L} - t_{184aL} - t_{181a} - t_{001a} - t_{002a} - t_{003a} - t_{004a} - t_{005a} - t_{006a} - t_{113a} - t_{188aL} - t_{314L} - t_{315L} - ta3 - t_{315U} - t_{314U} - t_{188aU} - t_{123a} - t_{007a} - t_{008a} - t_{009a} - t_{014a} - t_{189aL} - t_{304L} - t_{305L} - tb4 - t_{305U} - t_{304U} - t_{189aU} - t_{024a} - t_{010a} - t_{011a} - t_{016a} - t_{191aL} - t_{308L} - t_{309L} - tc6 - t_{309U} - t_{308U} - t_{191aU} - t_{026a} - t_{012a} - t_{020a} - t_{004a} - t_{005a} - t_{006a} - t_{007a} - t_{024a} - t_{018a} - t_{019a} - t_{182a} - t_{185aU} - t_{302U} - t_{303U} - t_o$

▪ **Seqüência 3:**

(desde a entrada, passando por Mch1, Mch2 e Mch6, até a saída, usando o AGV B)

$t_i - t_{301L} - t_{300L} - t_{184bL} - t_{181b} - t_{001b} - t_{002b} - t_{003b} - t_{004b} - t_{111b} - t_{186bL} - t_{310L} - t_{311L} - ta1 - t_{311U} - t_{310U} - t_{186bU} - t_{121b} - t_{005b} - t_{112b} - t_{187bL} - t_{312L} - t_{313L} - tb2 - t_{313U} - t_{312U} - t_{187bU} - t_{122b} - t_{006b} - t_{007b} - t_{008b} - t_{009b} - t_{010b} - t_{011b} - t_{016b} - t_{191bL} - t_{308L} - t_{309L} - tc6 - t_{309U} - t_{308U} - t_{191bU} - t_{026b} - t_{012b} - t_{020b} - t_{004b} - t_{005b} - t_{006b} - t_{007b} - t_{024b} - t_{018b} - t_{019b} - t_{182b} - t_{185bU} - t_{302U} - t_{303U} - t_o$

▪ **Seqüência 4:**

(desde a entrada, passando por Mch3, Mch4 e Mch5, até a saída, usando o AGV B)

$t_i - t_{301L} - t_{300L} - t_{184bL} - t_{181b} - t_{001b} - t_{002b} - t_{003b} - t_{004b} - t_{005b} - t_{006b} - t_{113b} - t_{188bL} - t_{314L} - t_{315L} - ta3 - t_{315U} - t_{314U} - t_{188bU} - t_{123b} - t_{007b} - t_{008b} - t_{009b} - t_{014b} - t_{189bL} - t_{304L} - t_{305L} - tb4 - t_{305U} - t_{304U} - t_{189bU} - t_{024b} - t_{010b} - t_{015b} - t_{190bL} - t_{306L} - t_{307L} - tc5 - t_{307U} - t_{306U} - t_{190bU} - t_{025b} - t_{011b} - t_{012b} - t_{020b} - t_{004b} - t_{005b} - t_{006b} - t_{007b} - t_{024b} - t_{018b} - t_{019b} - t_{182b} - t_{185bU} - t_{302U} - t_{303U} - t_o$

CONCLUSÃO

Em Sistemas Automatizados de Manufatura, encontrados na literatura, existem diferentes técnicas de estudo para planejamento de processos e para controle, com diferentes características. Dentre as técnicas que podem ser encontradas, destacam-se: Cadeias de Markov, Teoria de Filas e Redes de Petri (PN).

Em função de algumas limitações encontradas nas duas primeiras, muitos autores têm buscado por melhores resultados utilizando PN. Com isso, muitos trabalhos têm apontado para utilização de Redes de Petri como uma técnica promissora para obtenção de melhores resultados.

Entretanto, ainda há alguns problemas para modelagem de Sistemas Automatizados de Manufatura utilizando PN (nas suas diversas extensões), notadamente quando o sistema a ser modelado é relativamente grande ou complexo. Pois, essa situação introduz uma grande quantidade de elementos no grafo, tornando a modelagem e interpretação do modelo, tarefas difíceis.

Como alternativa a essa situação, propôs-se nesse trabalho, uma metodologia de modelagem de SAM, que usa uma nova extensão de PN, chamada Rede de Petri Virtual.

Essa metodologia descreve uma abordagem de modelagem baseada no processo de fabricação, ou mais especificamente em todos os locais por onde uma peça passará para ser considerada “acabada”.

Os modelos inicialmente obtidos (módulos) são referentes a cada um dos elementos do sistema (estações, veículos, etc.) e devem descrever nós comuns (lugares e transições), através dos quais os módulos podem ser associados.

A partir da obtenção dos módulos, um método de associação pode ser empregado para gerar o modelo final. Entretanto, esse método usa PN Virtual, e para a utilização da metodologia, todos os nós de associação dos módulos devem ser referidos como elementos virtuais.

Resumindo, para o emprego dessa metodologia, deve-se construir módulos representativos de elementos do sistema, considerando-se o plano de processo, avaliando-se as interações entre módulos, e utilizando-se PN Virtual.

Para a verificação dessa proposta, apresentou-se nos capítulos 2, 3 e 4, uma revisão sobre o ambiente de manufatura automatizada, algumas classes de PN e algumas aplicações de PN em manufatura automatizada.

No capítulo 5 foi apresentada uma abordagem de modelagem desses sistemas, e apresentados os modelos (módulos) de alguns elementos (estações de trabalho, AGVs, rotas e processos alternativos de fabricação) com os nós de associação. Também foram apresentadas as associações entre os módulos.

No capítulo 6 foram apresentados a formalização da PN Virtual e também do método de associação.

Finalmente, no capítulo 7 foi apresentado um exemplo de sistema automatizado de manufatura e a aplicação da metodologia.

Analisando-se os resultados pode-se dizer que essa abordagem permite a construção de um modelo de um sistema de uma forma mais simples em relação a outras abordagens, não somente pela forma de construção dos módulos, que considera os elementos e o plano de processo, mas também pela possibilidade de re-utilização desses módulos na modelagem de sistemas similares.

Nos módulos descritos, várias outras considerações poderiam ser contempladas, de maneira a refinar os modelos, tornando-os mais representativos ou próximos das características de um sistema real.

Entretanto tal refinamento não foi desenvolvido para não se desviar do foco principal do trabalho, que era a construção de um modelo geral. Além disso, foi indicado como esse refinamento pode ser executado em cada um dos módulos, sem prejuízo para o método de modelagem.

Além disso, uma vez que a metodologia foi empregada e validada para Rede de Petri Lugar-Transição, pode-se aplicar a mesma metodologia para outras extensões de Rede de Petri dela “descendentes”.

Verifica-se ainda, a necessidade de utilização de uma ferramenta computacional que facilite a edição de cada um dos módulos, assegure a correta denominação de “nós” correspondentes em diferentes módulos, auxilie a evitar a citação de “nós” com mesma denominação em diferentes módulos sem alguma correspondência e, principalmente, desempenhe a sistemática de associação dos módulos, para permitir a análise do modelo geral do sistema.

Finalmente pode-se sugerir, como continuidade desse trabalho:

- inserção desse método em uma ferramenta computacional de arquitetura aberta, já disponível;
- refinamento de módulos para construção de um modelo de controle de Sistemas Automatizados de Manufatura;
- construção de modelos de módulos de outros elementos de manufatura possíveis de serem encontrados;
- criar uma pequena base de módulos na ferramenta computacional;
- estender essa técnica para outras extensões de PN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINHO, OSWALDO LUIZ. 1989. *Manufatura Integrada por Computador*; Notas de Aula, Faculdade de Engenharia, Universidade de Campinas.
- AGOSTINHO, OSWALDO LUIZ. 1989. *Sistemas Flexíveis de Manufatura*, Notas de Aula, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- AGOSTINHO, OSWALDO LUIZ. 1991. *Manufatura Integrada por Computador*; Projeto CIM-Brasil, ABINEE.
- AL-JAAR, R. Y.; DESROCHERS, A. A. 1990. *Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri nets*. IEEE Journal of Robotics and Automation, 6(6), pp 621-639.
- AUSFELDER, CHRISTIAN; CASTELAIN, EMMANUEL; GENTINA, JEAN-CLAUDE. 1993. *A Hierarchical Modular Model of Flexible Manufacturing Systems*. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Piscataway, NJ, USA, vol. 1, pp.48-53.
- AUSFELDER, CHRISTIAN; CASTELAIN, EMMANUEL; GENTINA, JEAN-CLAUDE. 1994. *A Method for Hierarchical Modelling of the Command of Flexible Manufacturing Systems*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 24, no. 4, April.
- BOBBIO A.; TELEK M. 1998. *Non-Exponential Stochastic Petri Nets: An Overview of Methods and Techniques*. Computer Systems Science and Engineering, vol. 13, pp 339-351.
- BOSE, PARTHA PROTIM. 1986. *Basics of AGV Systems*; American Machinist and Automated Manufacturing, March.

- CALVEZ S.; AYGALINC P.; BONHOMME P. 1998. *Transient Functioning Mode of Manufacturing systems With Operation Time Constraints*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 14, pp 694-703.
- CAMARGO, HELOISA DE A.. 1993. *Modelagem, Projeto e Verificação de Bases de Regras Nebulosas via Teoria de Redes*; Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.
- CAO, TIEHUA; SANDERSON, ARTHUR C. 1992. *Task Decomposition and Analysis of Assembly Sequence Plans Using Petri Nets*. Proceedings of 3rd International Conference on Computer Integrated Manufacturing, RPI, Troy, NY, May, pp. 138-147.
- CARDOSO, JANETTE; VALETTE, ROBERT. 1997. *Redes de Petri*. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina.
- CHOI, BONG WAN; KUO, WAY; JACKMAN, J. K.. 1994. *Petri Net Extensions for Modelling and Validating Manufacturing Systems*. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 8, pp 1819-1835.
- CLAVER, J. F.; HARHALAKIS, G.; PROTH, J. M.; SAVI, V. M.; XIE, X. L. 1991. *A Step-wise Specification of a Manufacturing System Using Petri Nets*. Proceedings of the 1991 IEEE SMC International Conference on Systems, Man, and Cibernetics, October, pp 373-378.
- DESROCHERS, ALAN A.; AL-JAAR, ROBERT Y. 1997. *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems*, IEEE Publications.
- D'SOUZA, KELWYN A.; KHATOR, SURESH K.. 1994. *A Survey of Petri Net Applications in Modeling Controls for Automated Manufacturing Systems*. Computer in Industry, vol. 24, pp. 5-16.
- EGBELU, P. J. AND TANCHOCO, J. M. A.. 1984. *Characterization of Automatic Guided Vehicle Dispatching Rules*; International Journal of Production Research, vol.22.

- EGBELU, P. J.; ROY, N.. 1988. *Material Flow Control in AGV/Unit Load based Production Lines*; International Journal of Production Research, vol.26, no.1, pp. 81-94.
- EZPELETA, JOAQUÍN; COLOM, JOSÉ MANUEL.. 1997. *Automatic Synthesis of Colored Petri Nets for the Control of FMS*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 13, no. 3, June, pp 327-337.
- EZPELETA, J.; MARTINEZ, J. 1992. *Petri Nets as a Specification Language for Manufacturing Systems*. Robotics and manufacturing Systems, pp 427-436.
- FELDMANN K.; COLOMBO A. W. 1998. *Material Flow and Control Sequence Specification of Flexible Production Systems Using Coloured Petri Nets*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 14, pp 760-774.
- FERRARINI, L.; NARDUZZI, M.; TASSAN-SOLET, M.. 1994. *A New Approach to Modular Liveness Analysis Conceived for Large Logic Controllers' Design*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, no. 2, April, pp 169-184.
- FERRARINI, LUCA; TRIONI, MASSIMO.. 1996. *Modelling Shared Resources with Generalized Synchronization within a Petri Net Bottom-up Approach*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics, vol. 26, no. 4, August, 653-659.
- GENRICH, H. J. ; LAUTENBACK, K.. 1980. *Systems Modelling with High-Level Petri Nets.*, Theoretical Computer Science, Amsterdam, v.13, no.1, pp.109 -136.
- GROOVER, MIKELL P.. 1987. *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*, Prentice-Hall, Inc., USA.
- GUNN, THOMAS G.. 1981. *Computer Applications in Manufacturing*; Industrial Press Inc..
- HSIEH S.; HWANG J. S.; CHOU H. C. 1998. *A Petri-Net-Based Structure for AS/RS Operation Modelling*, International Journal of Production Research, vol. 36, pp 3323-3346.



- HSEIH S.; KANG M. Y. 1998. *Developing AGVS Petri Net Control Models from Flowpath Nets*. Journal of manufacturing Systems, vol. 17, pp 237-250.
- INAMASU, RICARDO Y.. 1995. *Modelo de FMS: Uma plataforma para simulação e controle*. Tese de doutorado apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. São Carlos, 230 p.
- INAMASU, RICARDO Y.; PORTO, ARTHUR J.V.. 1993. *A Production Planning System Based on a Temporal Petri Net*. Second International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Singapore.
- JENG, MU DER; CHEN S. C. 1999. *Heuristic Search Based on Petri Net Structure for FMS Scheduling*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, pp 196-202.
- JENG, MU DER.. 1997. *A Petri Net Synthesis Theory for Modelling Flexible Manufacturing Systems*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics, vol. 27, no. 2, April, pp 169-183.
- JENG, MU DER.; DICESARE, Frank. 1993. *A Class of Petri Net for Modeling and Control of Flexible Manufacturing and Assembly Systems with Shared Resources*; IFAC.
- KELLERT, PATRICK; TCHERNEV, NICOLAY; FORCE, CHRISTINE. 1997. *Object-Oriented Methodology for FMS Modelling and Simulation*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 10, no. 6, pp. 405-434.
- KOCHAN, DETLEF. 1986. *CAM: Developments in Computer-Integrated Manufacturing*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- KUO C. H.; HUANG H. P.; YEH M. C. 1998. *Object-Oriented Approach of MCTPN for Modelling Flexible Manufacturing Systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 14, pp 737-749.
- LEE, D. Y.; DICESARE, F. 1994. *Scheduling Flexible Manufacturing Systems Using Petri Nets and Heuristic Search*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 10(2), pp 123-132.

- LEE-KWANG, HYUNG; FAVREL, JOEL; OH, GIL-ROK. 1987. *Hierarchical Decomposition of Petri Net Languages*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SCM-17, no. 5, September-October, pp 877-878.
- LEWIS F. L.; GUREL A.; BOGDAN S.; DOGANALP A.; PASTRAVANU O. C. 1998. *Analysis od Deadlock and Circular Waits Using a Matrix Model for Flexible Manufacturing Systems*. Automatica, vol. 34, pp 1083-1100.
- LIANG, G. R.; HONG, H. M. 1994. *Hierarchy Transformation Method for Repetitive Manufacturing System Specification, Design, Verification and Implementation*. Computer Integrated Manufacturing Systems, vol. 7, no. 3, pp. 191-205.
- LIN, E. Y. T.; ZHOU C. 1999. *Modeling and Analysis of Message Passing in Distributed Manufacturing Systems*. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C – Applications and Reviews, vol. 29, pp 250-262.
- LIN, JAMES T.; LEE, CHIA-CHU.. 1994. *Modular Modelling for Performance Evaluation of Robot-Centred Manufacturing Cells Using Timed Petri-Nets*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 9, pp. 271-280.
- LIU, C.-M.; WU, F.-C. 1993. *Using Petri Nets to Solve FMS Problems*. INTERNATIONAL Journal of Computer Integrated Manufacturing, 6(3), pp 175-185.
- LONG, J.; DESCOTES-GENON, B.. 1993. *Control Synthesis of Flexible Manufacturing Systems Modeled by a Class of Controlled Timed Petri Nets*. IFAC, vol. 1, pp. 245-248.
- MAXWELL, W. L.; MUCKSTADT, J. A.. 1982. *Design of Automated Guided Vehicle Systems*. IIE Transactions, vol.14, no. 2, 114-124.
- MEREDITH, J. R. AND HILL, M. M.. 1987. *Justifying New Manufacturing System: a Managerial Approach Sloan*; Management Review, vol. 28, no.4.
- MIYAGI, PAULO E.; HASEGAWA, KENSUKE; TAKAHASHI, KOUJI. 1989. *Mark Flow Graph (MFG) para Modelamento e Controle de Sistemas de Eventos Discretos*. Monografias em Automação e Inteligência Artificial, vol.1, no. 1, 1.1-1.10.

- MIYAGI, PAULO EIGL. 1993. *Controle de Sistemas de Eventos Discretos*. Tese de livre docência apresentada na Escola Politécnica - POLI/USP. São Paulo, 174 p.
- MOORE, K. E.; GUPTA, S. M. 1999. *Stochastic Coloured Petri Net (SCPN) Models of Tradicional and Flexible Kanbans Systems*. International Journal of Production Research, vol. 37, pp 2135-2158.
- MOORE K. E.; GUNGOR A.; GUPTA S. M. 1998. *A Petri Net Approach to Disassembly Process Planning*. Computer & Industrial Engineering, vol. 35, pp165-168.
- MOORE, K. E.; GUPTA, S. M. 1996. *Petri Net Models of Flexible and Automated Manufacturing Systems: A Survey*. International Journal of Production Research, vol. 34, pp 3001-3035.
- MORANDIN JR., ORIDES; INAMASU, RICARDO Y.; KATO, EDILSON R. R.; PORTO, ARTHUR J. V. 1995. *Dimensionamento de um Sistema de AGVs em um FMS através de Simulação*; XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, II Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica.
- MORANDIN JR., ORIDES; KATO, EDILSON R. R.; PORTO, ARTHUR J. V. 1995. *Um Sistema Especialista para o Dimensionamento de um Sistema de AGVs em um FMS baseado em Simulação*; XVI Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia.
- MORANDIN JR., ORIDES. 1994. *Projeto e Construção de um Veículo Auto-guiado para Sistemas Flexíveis de Manufatura*; Dissertação de Mestrado; Escola de Engenharia de São Carlos, 123 p.
- MORANDIN JR., ORIDES; PALMA, JANDIRA G.; PORTO, ARTHUR J. V.. 1993. *Sistema de Integração de Veículo Auto-Guiado em Sistemas Flexíveis de Manufatura*. XIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - I Congresso Latino Americano de Engenharia Industrial.
- MURATA, TADAO. 1989. *Petri Nets - Properties, Analysis and Applications*. Proceedings of the IEEE, vol.77, n.4, p.541 -580.

- O'GRADY, P. J.; MENON, U.. 1986. *A Concise Review of Flexible Manufacturing Systems and FMS Literature*. Computers in Industry, vol. 7, pp. 155-167.
- ODED, BERMAMN; ODED, MAIMON. 1986. *Cooperation among Flexible Manufacturing Systems*; IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, n.1, March.
- PENG C.; CHEN F. F. 1998. *Real-Time Control and Scheduling of Flexible manufacturing Systems: An Ordinal Optimization Based Approach*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 14, pp 775-786.
- PETERSON, JAMES L. 1981. *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Prentice-Hall, Inc.
- PIERSON, R. A.. 1984. *Adapting Horizontal Material Handling Systems to Flexible Manufacturing Systems*; Industrial Engineering, 16, n.3, pág. 62-71.
- POLITANO, PAULO ROGÉRIO. 1993. *Especificação e Implementação de uma Unidade de Controle para Célula Flexível de Manufatura*; Dissertação de Mestrado, EESC - USP.
- PORTO, ARTHUR J. V.. 1990. *Desenvolvimento de um método de integração do planejamento do processo de fabricação e do planejamento e controle da produção, baseado na flexibilidade do processo de fabricação*. Tese de doutorado apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. São Carlos, 236p.
- PROTH, JEAN-MARIE; XIE, XIAOLAN.1996. *Petri Nets: A Tool for Design and Management of Manufacturing Systems*. John Wiley & Sons Ltd.
- RAJU, K. RAVI; CHETTY, O. V. KRISHNAIAH. 1993. *Design and Evaluation of Automated Guided Vehicle Systems for flexible Manufacturing Systems: An Extended Timed Petri Net- Based Approach*. Intenational Journal of Production Research, vol. 31, no. 5, pp. 1069-1096.
- RAJU, K. R.; CHETTY, O. V. K. 1993A. *Addressing Design and Control Issues Of AGV-based FMSs With Petri Net Aided Simulation*. Computer Integrated Manufacturing Systems, 6(2), pp 125-134.

- RAJU, K. R.; CHETTY, O. V. K. 1993B. *Design and Evaluation of Automated Guided Vehicle Systems for flexible Manufacturing Systems: An Extended Timed Petri Net-based Approach*. International Journal of Production Research, 31(5), pp 1069-1096.
- RAVINDRAN, A.; FOOTE, B. L.; BADIRU, A.; LEEMIS, L.; WILLIAMS, L.. 1988. *Mechanized Material Handling Systems Design and Routing*, Computer Industrial Engineering, vol.14, no.3.
- RIGHINI, G.. 1993. *Modular Petri Nets for Simulation of Flexible Production System*. International Journal of Production Research, v.31, no.10, October, p.2463-2477.
- SEIFODDINI, H.; ZHANG, J. 1996. *Application of Simulation and Petri Net Modelling in Manufacturing Control Systems*. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 1, pp. 191-207.
- SHOPBELL, P. E. MARLIN.. 1986. *Automated Inter-equipment Transport*, Semiconductor International, 121-123, November.
- TAGHABONI, FATANEH; TANCHOCO, J. M. A.. 1988. *A LISP-Based Controller for Free-Ranging Automated Guided Vehicle Systems*. International Journal of Production Research, vol. 26, no. 2, 173-188.
- TENG, SHENG-HSIEN (GARY); ZHANG JIE. 1993. *A Petri Net Based Decomposition Approach in Modelling of manufacturing Systems*. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 6, pp. 1423-1439.
- TRONCO, MÁRIO LUIZ. 1992. *Estudo, Projeto e Construção de um Sistema Automatizado de Coleta e Armazenamento de "Pallets"*; Dissertação de Mestrado, EESC - USP.
- VALETTE, R.; COURVOISIER, M.; MAYEUX D.. 1982. *Control of Flexible Production Systems and Petri Nets*. 3rd. European Workshop on Theory and Applications of Petri Nets. Varenna, Italy.

- VENKATESH, K.; ZHOU, M.-C.; KAIGHOBADI, M.; CAUDILL, A.. 1996. *A Petri Net Approach to Investigating Push and Pull Paradigms in Flexible Factory Automated Systems*. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 3, pp. 595-620.
- VISWANADHAM, N.; NARAHARI, Y.; JOHNSON, TOMOTHY L.. 1990. *Deadlock Prevention and Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems Using Petri Net Models*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 6, no. 6, December.
- VISWANADHAM, N.; RAM, R. 1994. *Composite Performance-Dependability Analysis of Cellular Manufacturing Systems*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 10(2), pp 245-258.
- WATSON, J. F. I.; DESROCHERS, A., A. 1991. *Applying Generalized Stochastic Petri Nets to Manufacturing Systems Containing Nonexponential Transitions Functions*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cibernetics, 21(5), pp 1008-1017.
- WU, N. Q. 1999. *Necessary and Sufficient Conditions for Deadlock-Free Operation in Flexible Manufacturing Systems Using a Colored Petri Net Model*. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C – Applications and Reviews, vol. 29, pp 192-204.
- ZHANG, J.; GU, J.; LI P. G.; DUAN Z. C. 1999. *Object-oriented Modeling of Control System for Agile Manufacturing Cells*. International Journal of Products Economics, vol. 62, pp 145-153.
- ZEIGLER, BERNARD P.. 1990. *Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic Systems*. Academic Press, Inc.; London; 1990.
- ZHOU, M.; MCDERMOTT, K.; PATEL, P.; TANG, T. 1991. *Construction of Petri Net Based Mathematical Models of na FMS Cell*. Proceedings of the 1991 IEEE/SMC International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October, pp 367-372.

- ZHOU, MENGCHU; MCDERMOTT, KEVIN; PATEL, PARESH A.. 1993. *Petri net Synthesis and Analysis of a Flexiible Manufacturing System Cell*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 2, March.
- ZURAWSKI, RICHARD; ZHOU, MENGCHU.. 1994. *Petri Net and Industrial Applications: A Tutorial*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, no. 6, December.
- ZUSSMAN E.; ZHOU M. C. 1999. *A Methodology for Modeling and Adaptive Planning of Disassembly Process*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, pp 190-194.