

**JAIRO RAFAEL CANTILLO MOLINA**

**UMA ABORDAGEM HÍBRIDA PARA O CONTROLE  
DE SISTEMAS DE MANUFATURA BASEADA NA  
TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO E NAS  
REDES DE PETRI COLORIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

**CURITIBA**

**2007**

**JAIRO RAFAEL CANTILLO MOLINA**

**UMA ABORDAGEM HÍBRIDA PARA O CONTROLE  
DE SISTEMAS DE MANUFATURA BASEADA NA  
TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO E NAS  
REDES DE PETRI COLORIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Área de Concentração: Automação e Controle de Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Marco A. Buseti de Paula

**CURITIBA**

**2007**

**JAIRO RAFAEL CANTILLO MOLINA**

**UMA ABORDAGEM HÍBRIDA PARA O CONTROLE DE  
SISTEMAS DE MANUFATURA BASEADA NA TEORIA DE  
CONTROLE SUPERVISORIO E NAS REDES DE PETRI  
COLORIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos**  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

---

**Prof. Dr. Marco Antonio Buseti de Paula**  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

---

**Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures**  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

---

**Prof. Dr. Max Hering de Queiroz**  
Universidade Federal de Santa Catarina

**CURITIBA**

**2007**

Cantillo Molina, Jairo Rafael

Uma abordagem Híbrida para o Controle de Sistemas de Manufatura baseada na Teoria de Controle Supervisório e nas Redes de Petri Coloridas. 2007, 80p

Dissertação – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.

1. Sistemas Flexíveis de Manufatura 2. Teoria de Controle Supervisório 3. Redes de Petri Coloridas 4. Sistemas a Eventos Discretos.

I. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pelas graças e oportunidades obtidas durante minha vida, especialmente no período de realização do curso.

Agradeço a minha família, meus pais por sempre terem me apoiado e incentivado em todo momento e a minha irmã pelo seu apoio sincero e incondicional.

Aos professores Eduardo Portela, Marco Buseti e Eduardo Loures, pela oportunidade de realizar o curso, pela sua amizade, pelo conhecimento compartilhado, pelo suporte e apoio constante prestado ao longo desta caminhada.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho, especialmente Welington Desan e Nilson Bastos por sempre contribuir, incentivar e facilitar o desenvolvimento deste trabalho.

Às demais pessoas que de alguma maneira contribuíram para que a conclusão deste trabalho tenha sido possível.

## Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de uma arquitetura híbrida de controle para sistemas flexíveis de manufatura. Essa arquitetura é baseada em dois formalismos: a Teoria de Controle Supervisório e as Redes de Petri Coloridas. A Teoria de Controle Supervisório e uma das suas extensões, a abordagem modular local, são utilizadas para tratar requisitos de controle relacionados à segurança e seqüenciamento de eventos. As Redes de Petri Coloridas são utilizadas para tratar o roteamento dos produtos no sistema de manufatura bem como informações provenientes do Planejamento e Controle da Produção – PCP. É proposta uma nova arquitetura de controle que incorpora os dois tratamentos. Para testar a abordagem proposta, é realizada a modelagem e a síntese da lógica de controle de um sistema de manufatura em que rotas de produção são possíveis de serem realizadas.

## **Abstract**

This paper presents a hybrid control approach for flexible manufacturing systems. The architecture is based on two formalisms: Supervisory Control Theory and Colored Petri Nets. Supervisory Control Theory and one of its extensions, the local modular approach, are used for treating safety and sequence related requirements. Colored Petri Nets are used to treat product routing in manufacturing systems, as well as information from Production Control and Planning (PCP). A new control architecture is proposed, where both treatments are included. To test the proposed approach, a real manufacturing system where different production routes can be implemented is modeled and the control logic is synthesized.

# Sumário

AGRADECIMENTOS .....	v
Resumo .....	vi
Sumário .....	viii
Lista de Abreviaturas .....	xi
<b>Capítulo 1</b> .....	1
Introdução .....	1
<b>Capítulo 2</b> .....	4
Planejamento e Controle da Produção .....	4
2.1 Evolução, de MRP a ERP .....	4
2.2 MRPII ( <i>Manufacturing Resource Planning</i> ) .....	5
2.3 ERP ( <i>Enterprise Resource Planning</i> ) .....	6
2.4 Estrutura dos Sistemas de Planejamento e Controle da Produção .....	7
2.5 Sistemas Flexíveis de Manufatura .....	8
2.6 Distribuição Física de Controle em FMS .....	9
<b>Capítulo 3</b> .....	11
Fundamentação Teórica .....	11
3.1 Teoria de Linguagens e Autômatos .....	13
3.1.1 Linguagens .....	13
3.1.2 Autômatos .....	14
3.1.3 Propriedades dos Autômatos .....	15
3.2 Teoria de Controle Supervisório .....	17
3.2.1 Supervisores .....	17
3.2.2 Controle Monolítico .....	18
3.2.3 Controle Modular Clássico .....	19
3.2.4 Controle Modular Local .....	20
3.2.5 Síntese de Supervisores Modulares .....	20
3.3 Redes de Petri Coloridas .....	23
<b>Capítulo 4</b> .....	27
Concepção da Arquitetura de Controle .....	27
4.1 Concepção do Nível Supervisório .....	31
4.2 Concepção do Coordenador de Roteamento .....	33
4.2.1 Processo de modelagem .....	33
<b>Capítulo 5</b> .....	38
Modelagem e Ambiente Experimental .....	38
5.1 Estrutura Física do laboratório .....	38
5.2 Estrutura Física de Controle .....	40
5.3 Modelagem do Sistema Físico .....	41
5.3.1 Modelagem do Nível Supervisão .....	43
5.3.2 Modelagem do Nível de Coordenação de Roteamento .....	51
<b>Capítulo 6</b> .....	59
Conclusões e Trabalhos Futuros .....	59
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	60

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Estrutura de um sistema de Planejamento de Recursos.....	7
Figura 3.1: Diagrama de transição de estado.....	15
Figura 3.2: Controle Monolítico.....	18
Figura 3.3: Controle Modular Clássico.....	19
Figura 3.4: Controle Modular Local.....	20
Figura 3.5: Sistema Produto.....	21
Figura 3.6: Síntese de Plantas Locais.....	21
Figura 3.7: Estrutura de Controle [Queiroz e Cury 2002].....	22
Figura 4.2. Exemplo de estrutura de rede.....	34
Figura 4.3 Estrutura básica de comunicação e decisão.....	37
Figura 5.1: Estrutura e Layout do laboratório LAS1.....	39
Figura 5.2: Estrutura Física de Controle.....	40
Figura 5.6. Vista Parcial do Sistema de Transporte.....	43
Figura 5.7. Modelos dispositivos $ST_1 - IX_1$ .....	45
Figura 5.8. Especificação de segurança (Não determinística – Determinística).....	46
Figura 5.9. Supervisor Modular Local Reduzido – Subsistema Tipo I.....	46
Figura 5.10. Modelos dispositivos $IX_1 - M_1$ .....	47
Figura 5.11. Especificação de segurança ( $IX_1 - M_1$ ).....	47
Figura 5.11. Supervisor Modular Local Reduzido – Subsistema Tipo II.....	48
Figura 5.13. Modelos dispositivos $ST_2 - SH_1 - ST_4$ .....	48
Figura 5.14. Especificação de segurança ( $ST_2 - SH_1 - ST_4$ ).....	49
Figura 5.15. Supervisor Modular Local Reduzido – Subsistema Tipo III.....	49
Figura 5.16. Modelos dispositivos $ST_4 - ST_3 - ST_7$ .....	50
Figura 5.17. Especificação de segurança $ST_4 - ST_3 - ST_7$ (Não Determinística – Determinística).....	50
Figura 5.18. Supervisor Modular Local Reduzido – Subsistema Tipo IV.....	51
Figura 5.19. Camadas interface de comunicação.....	52
Figura 5.20. Formato do pacote de comunicação Comms/CPN.....	53
Figura 5.21. Formato do arquivo de comunicação PCP-Coordenação de Roteamento.....	54
Figura 5.22. Inicialização Coordenação de Roteamento.....	55
Figura 5.23 Modelo em RPC da coordenação de roteamento, estagio inicial.....	56
Figura 5.24. Modelo em RPC da coordenação de roteamento. Modelagem decisão de roteamento SH1.....	56
Figura 5.25. Diagrama de Codificação.....	58

## Lista de Tabelas

<i>Tabela 5.1: Nomenclatura de eventos</i> .....	44
--------------------------------------------------	----

## Lista de Abreviaturas

CIM	Manufatura Integrada por Computador ( <i>Computer Integrated Manufacturing</i> )
AGVs	Veículos Auto-Guiado ( <i>Automated Guided Vehicles</i> )
AS/RS	Sistema de Armazenagem Automático ( <i>Automated Storage and Retrieval System</i> )
BOM	Lista de Materiais ( <i>Bill of Materials</i> ).
CPN	Colored Petri Nets
CNC	Controle Numérico Computacional ( <i>Computer Numeric Control</i> )
ERP	Planejamento de Recursos Corporativos ( <i>Enterprise Resource Planning</i> ).
FMS	Sistemas Flexíveis de Manufatura ( <i>Flexible Manufacturing Systems</i> ).
IP	Internet Protocol
LAS	Laboratório de Automação de Manufatura
LUCAS	Layered Universal Controller for Automation Systems
MES	Sistema de Execução da Manufatura ( <i>Manufacturing Execution Systems</i> )
MPS	Programação Mestre da Produção ( <i>Master Production Scheduling</i> )
MRP	Planejamento de Necessidades de Material ( <i>Material Requirement Planning</i> )
PLC	Controlador Lógico Programável ( <i>Programmable Logic Controllers</i> )
PCP	Planejamento e Controle da Produção
RPC	Redes de Petri Coloridas.
Rpx	Resposta a Finalização de Evento de Pedido X ( <i>Report X</i> )
Rqx	Pedido de Alocação de recurso ou início de operação X ( <i>Request X</i> )
SCARA	Atuador Robótico tipo Braço para Montagem ( <i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i> )
SED	Sistemas a Eventos Discretos
TCP	Transmission Control Protocol
TCS	Teoria de Controle Supervisório

# Capítulo 1

## Introdução

Na atualidade a grande demanda por produtos manufaturados e a sempre crescente exigência por qualidade e produtividade têm influenciado os sistemas produtivos a tornarem-se cada vez mais eficientes, mais lucrativos e mais seguros. Estas exigências aliadas aos avanços tecnológicos influenciaram na implantação de linhas e sistemas de manufatura com grande concentração de máquinas automáticas e sistemas avançados de informação. Quando estes sistemas utilizam a tecnologia da informação para o suporte das atividades de manufatura para uma mais eficiente comunicação, coordenação e cooperação com o elemento humano, e os outros componentes do sistema de manufatura, são chamados de sistemas integrados de manufatura por computador (CIM) (Kumar, 2004).

A inserção de sistemas avançados de informação e maquinaria com tecnologia de comunicação e versatilidade operativa proporcionaram aos sistemas de manufatura a possibilidade de executar operações de modificação e transporte de material, modificação de rotas de processamento, inserção de produtos na linha de produção e re-configuração do layout da planta proporcionando ao processo produtivo uma maior flexibilidade, a qual é refletida numa maior agilidade de decisões e uma produção mais eficiente e com mais recursos de decisão para a empresa.

Uma característica desejada no funcionamento destes sistemas é que a integração entre todos seus componentes (máquinas, sistemas de informação e humanos) seja a maior possível, proporcionando a todos os níveis do processo produtivo, tanta informação quanto necessária para o suporte na tomada de decisões e melhorias do processo em geral. Sistemas integrados de manufatura por computador possuem diferentes estruturas e divisões onde o controle da produção é realizado, desde o controle financeiro, controle de material até o controle da planta física de produção.

Existem diversas ferramentas e abordagens para a análise, representação e projeto do controle da planta física de produção, sendo que na maioria das aplicações o projeto é realizado de forma intuitiva ou sustentado pela experiência do projetista. O uso de ferramentas formais matemáticas para realizar a análise e projeto de sistemas de controle para a planta está sendo explorado por diversos grupos de pesquisa, mas, é ainda um campo no qual muitas contribuições podem ser realizadas. A aplicação prática destas abordagens e conceitos ainda é pouca e é quase restrita ao meio acadêmico.

A Teoria de Controle Supervisório (TCS) (Ramadge & Wonham, 1989) foi desenvolvida com o objetivo de prover uma metodologia formal para a síntese de controladores de Sistemas a Eventos Discretos. A TCS faz uma distinção clara entre o sistema a ser controlado, denominado planta, e a entidade que o controla, a qual é denominada supervisor. A planta é um modelo que reflete o comportamento fisicamente possível dos diversos subsistemas, isto é, todas as ações que estes são capazes de executar na ausência de qualquer ação de controle. O papel do supervisor na TCS é, então, o de exercer uma ação de controle restritiva sobre os subsistemas, de modo a coordenar o comportamento concorrente e seqüencial destes, de forma a satisfazer um conjunto de especificações.

De acordo com Vieira et al. (2006), apesar da TCS estar bem consolidada, com diversas extensões e um grande número de publicações focando aspectos teóricos, aplicações desta teoria na indústria não são conhecidas. Uma das razões está relacionada às premissas da TCS associada às características dos sistemas de controle industriais atualmente disponíveis para a implementação dos supervisores. Estes aspectos são descritos em Fabian & Hellgren (1998). Outra dificuldade da aplicação da teoria diz respeito aos modelos dos sistemas de manufatura reais. Na literatura, em função do foco teórico da maioria dos trabalhos, os sistemas tratados são relativamente simples, o que conduz a um menor esforço de modelagem. Conforme apontado em Santos (2003), em sistemas de grande porte a etapa de modelagem dos requisitos de controle deve ser tratada de forma sistemática, em função da complexidade envolvida.

As Redes de Petri Coloridas (RPC) têm sido aplicadas na modelagem do comportamento dinâmico de sistemas de manufatura automatizados. Particularmente, podem ser encontrados trabalhos descrevendo aplicações industriais e propostas de implementação de estratégias de controle utilizando RPC (Belabbus & Berruet 2004, Caradec & Prunet 1996, Daene et al 1997, Dotoli & Fanti 2005, Sackmann et al 2000, Uzam & Wonham 2006, Wu & Zhou 2000, Zimmerman 1994). Em linhas gerais, as RPC são utilizadas na criação de

estruturas de controle mais complexas, em que existe a necessidade de representação e manipulação de uma maior quantidade de informações do sistema tratado.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe tratar o projeto de um sistema de controle a partir da utilização de dois formalismos: a Teoria de Controle Supervisório e as Redes de Petri Coloridas. A TCS, bem como a abordagem modular local (Queiroz e Cury, 2001), é utilizada para atender requisitos de segurança, intertravamentos e seqüenciamentos. As RPC tratam de requisitos que envolvem a manipulação de informações de roteamentos (mudanças de trajetórias de produtos nos diversos estágios da produção) e de planejamento da produção (quantidades e tipos de produtos). Esta estrutura híbrida é utilizada no controle de um sistema de manufatura didático, em que são necessárias mudanças de trajetórias de acordo com os roteiros de produção de determinados produtos. O modelo proposto por Queiroz e Cury (2002) é utilizado como arquitetura de implementação.

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma: o segundo capítulo introduz e apresenta a evolução dos sistemas de Planejamento e Controle da produção, o qual é necessário para entender o ambiente atual destes sistemas e a justificativa para a implementação da estrutura de controle proposta.

O terceiro capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento do trabalho, apresentando fundamentos e propriedades da Teoria de Linguagens e Autômatos baseada em linguagens controláveis, Teoria de Controle Supervisório e suas abordagens, finalizando com Redes de Petri e Redes de Petri Coloridas.

O quarto capítulo apresenta a arquitetura de controle proposta e a metodologia utilizada para a concepção dos níveis de controle utilizados na estrutura.

O quinto capítulo apresenta o ambiente experimental e a implementação da arquitetura proposta, baseada nos dois formalismos apresentados no terceiro capítulo.

O sexto capítulo finalmente apresenta as conclusões do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Planejamento e Controle da Produção

Neste capítulo é apresentada uma introdução e uma visão sobre como os sistemas de planejamento e controle da produção surgiram, como estes evoluíram, as suas estruturas, o seu estado atual, como eles têm influenciado no projeto e diferentes maneiras de executar a produção.

Os primeiros conceitos do MRP (*Material Requirement Planning*) foram desenvolvidos nos anos 60 e início dos 70 como uma resposta à sempre crescente economia nos anos pós-guerra. Esta economia era caracterizada por um grande crescimento da demanda por produtos manufaturados, sendo que neste período a demanda presente no mercado era maior do que a capacidade produtiva. Em resposta a este ambiente econômico especial, a indústria de manufatura viu-se forçada a desenvolver métodos para aumentar a produção, o qual refletiria em lucros maiores e mais rápidos (Kumar, 2004).

O desenvolvimento básico do MRP foi feito por Wight e Orlicky (1984); este trabalho foi focado em desenvolver um método otimizado para o planejamento dos requisitos de materiais com o propósito de satisfazer o processo de manufatura. Desde a concepção desta ferramenta, o cenário de atuação dela tem mudado constantemente, obrigando assim à evolução das suas funcionalidades e propriedades, passando pelo MRPII até os grandes e complexos pacotes ERP utilizados atualmente.

#### 2.1 Evolução, de MRP a ERP

Como descrito anteriormente o MRP foi desenvolvido com o objetivo de atender às necessidades do processo produtivo de uma maneira satisfatória e otimizada. Um sistema MRP é basicamente composto de cinco componentes, sendo o primeiro deles o MPS (*Master*

*Production Scheduling*), o qual é um diagrama que descreve e mostra o que e quando será cada item produzido, tendo em conta para realizar seus cálculos os recursos disponíveis, planejamento financeiro, demanda de clientes e fornecedores entre outros fatores. Para o sucesso deste componente, o sistema deve possuir a característica de ser constantemente re-alimentado, para que ajustes e compensações possam ser feitos a tempo. O segundo componente e parte principal deste sistema é considerada a previsão de vendas. O sistema é construído ao redor do BOMP (*Bill of Materials Processor*), o qual converte um plano discreto de produção de um produto num plano de produção para a compra ou produção de componentes. A demanda projetada é então comparada como os recursos disponíveis e, num horizonte de tempo, as ordens de produção são programadas e calculadas.

O terceiro componente do sistema é o acesso às informações de inventário disponível, o qual providencia dados fundamentais para o cálculo e as previsões a serem realizadas. Outro requerimento do MRP é o preciso conhecimento das ordens de compra; estas ordens podem ser obtidas pela interface e comunicação com um departamento de inventário e compras bem administrado. O quinto e último componente é o preciso conhecimento dos *lead-times* do processo; *lead-times* de ordens de compra, montagem e produção.

O avanço do MRP nos seus estágios iniciais foi suportado pela disponibilidade de ferramentas computacionais, as quais proveram poder de cálculo para a grande quantidade de dados que é necessário avaliar, eliminando os erros e falhas que os cálculos manuais introduziam no processo. Era agora possível, pela primeira vez, obter um planejamento preciso de compras e produção para suprir o processo de manufatura.

## **2.2 MRPII (*Manufacturing Resource Planning*)**

A evolução do sistema MRP tem sido constante com o decorrer dos anos. No início dos anos 80 o conceito principal de Wight era quase exclusivamente o cálculo do planejamento das necessidades materiais de produção. Este sistema evoluiu para um sistema corporativo capaz de planejar e controlar praticamente todos os seus processos e recursos. Esta abordagem deu origem ao termo MRPII, integrando produção, *marketing*, recursos humanos, engenharia, compras e todos os departamentos da empresa ao processo de planejamento.

O MRPII pode ser considerado como uma aplicação integrada, consistindo de vários módulos de funções as quais se desenvolvem ao redor de um banco de dados comum ao processo produtivo, o qual pode ser considerado como o núcleo principal de um sistema ERP (*Enterprise resource planning*) – CIM (*computer integrated manufacturing*).

## 2.3 ERP (Enterprise Resource Planning)

Nos anos 90 o conceito de MRP evoluiu muito mais; agora chamado de ERP, o qual é um termo criado pelo Gartner Group of Stamford, Connecticut, USA. Sua nova e melhorada filosofia inclui a inserção dos componentes externos à corporação, recursos de fornecedores e dinâmicas de consumidores e agendas. Um sistema ERP pode ser definido como um sistema de gerenciamento de negócios, o qual pode ser usado, quando implementado satisfatoriamente, para executar, gerenciar e integrar todas as funções dentro de uma organização. A implementação de um pacote de ERP pode trazer grandes benefícios a uma organização quando corretamente aplicado. Alguns destes benefícios incluem:

- A automação e integração de todos os processos de negócios dentre as funções e locações organizacionais;
- A habilitação da implementação de variações de “melhores práticas de negócios” (benchmarking), visando à melhoria e otimização da produtividade;
- A possibilidade de compartilhamento de dados e recursos comuns à organização, o qual resulta em uma redução de erros de cálculo;
- A produção e acesso de informação precisa e atualizada, tornando a tomada de decisões mais veloz, eficiente e barata (Shehab E.M. et al, 2004);
- A integração com fornecedores e clientes, oferecendo uma cadeia de suprimentos totalmente integrada.

Por estas e outras características as soluções ERP estão cada vez mais sendo utilizadas e implementadas nas empresas de manufatura flexível, onde as soluções tradicionais MRP e MRPII não fornecem a capacidade competitiva que a integração total de processos oferece.

Os sistemas de Planejamento e Controle da Produção caracterizam-se por possuir um grande fluxo e quantidade de informações; um ERP é um sistema de planejamento de recursos, o qual possui uma estrutura de fluxo de informações e toma de decisões semelhantes ao MRP original.

## 2.4 Estrutura dos Sistemas de Planejamento e Controle da Produção

Com a finalidade de efetuar uma análise do fluxo de informações e requisitos no funcionamento de um sistema de Planejamento de Recursos, é apresentada na Figura 2.1 a estrutura do MRP proposta por Ip et al. (1998).

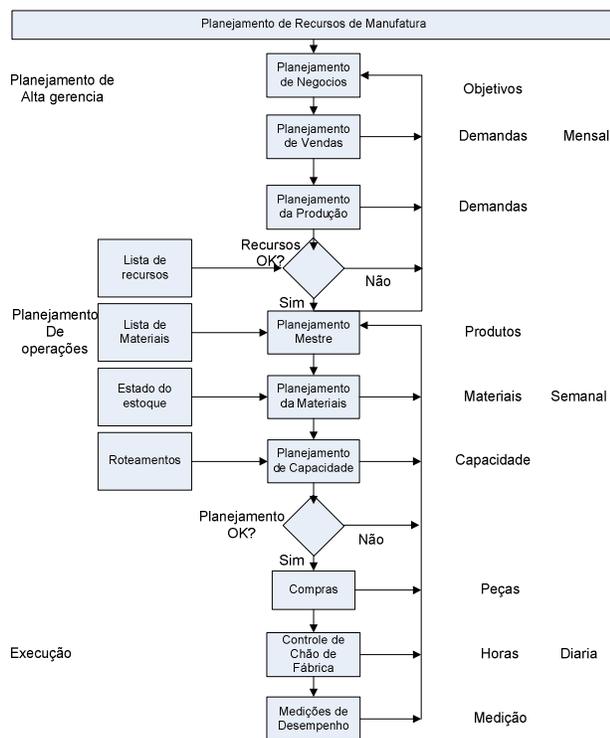


Figura 2.1: Estrutura de um sistema de Planejamento de Recursos.

Na estrutura observa-se a existência de três níveis, os quais são brevemente descritos a seguir:

- Planejamento da alta gerência: É composta pelo planejamento de vendas, negócios e produção. É neste nível que são estabelecidas metas, objetivos e demandas que se espera que o sistema produtivo seja capaz de cumprir;

- Planejamento de Operações: Neste nível são considerados os recursos do sistema, a análise do BOM, o estado do inventário atual e os possíveis roteamentos. Após a análise destes recursos determina-se o itinerário ou a agenda mestre da produção, o planejamento de materiais e a capacidade produtiva;

- Execução: O nível de execução é responsável pela realização das ações necessárias do processo produtivo. É aqui que são gerados as ordens de compra, o controle do chão de fábrica e as medições de desempenho.

É importante observar que entre os diferentes níveis do MRP encontra-se um estágio em que é verificado se os recursos e o planejamento do controle satisfazem o desejado por seus respectivos níveis superiores. Se as condições desejadas não são alcançadas prossegue-se a realização de um novo planejamento no nível requerido. Assim, o sistema encontra-se sempre num estado constante de realimentação, procurando sempre o melhor aproveitamento possível dos recursos e informações disponíveis.

## **2.5 Sistemas Flexíveis de Manufatura**

Um sistema flexível de manufatura caracteriza-se por ser conformado por diversas células de produção, as quais consistem em vários dispositivos de automação como robôs, máquinas CNC, AGVs e transportadores. Estes dispositivos atuam conjuntamente para proporcionar à célula a capacidade de produzir e operar em diversas configurações. Segundo Petroni e Bevilaqua (2002), identificam-se sete tipos diferentes de flexibilidade aplicáveis a sistemas de manufatura:

- Flexibilidade de máquinas: Refere-se aos diferentes números de atividades que uma máquina específica pode realizar sem implicar em grandes mudanças de desempenho da atividade produtiva;

- Flexibilidade de processo: Refere-se aos diferentes números de produtos que podem ser produzidos, sem implicar grandes mudanças de desempenho da atividade produtiva;

- Flexibilidade de produto: Refere à quantidade e aos diferentes tipos de produtos que podem ser introduzidos na produção sem afetar consideravelmente o ritmo e o desempenho do processo. Este tipo de flexibilidade pode ser utilizado como parâmetro para medir a capacidade de uma linha a se adaptar à competitividade e/ou mudanças de mercado;

- Flexibilidade de rotas: Refere-se ao diferente número de produtos que possuem rotas alternativas de produção e ao grau de variação destas rotas. Este conceito pode ser aplicado tanto para quando uma operação pode ser executada em mais de uma célula, quanto para quando um produto pode ser processado em seqüências alternativas;

- Flexibilidade de volume: Refere à capacidade da planta de flutuar a quantidade de elementos produzidos no processo. Esta flexibilidade aumenta proporcionalmente com a

automatização do processo, principalmente devido à redução de custos de setup e de custos operacionais;

- Flexibilidade de expansão: Refere-se à variedade de expansões que o sistema pode suportar. Uma medida de quão grande o sistema pode crescer, mantendo níveis de lucro e produção aceitáveis;

- Flexibilidade de layout: Refere-se à facilidade com que o layout interno do sistema produtivo pode ser modificado.

A característica de flexibilidade do processo produtivo é a principal motivação para executar o projeto de um sistema de supervisão e controle que permita tantas possibilidades quanto o sistema físico oferece.

## **2.6 Distribuição Física de Controle em FMS**

Em um FMS, dependendo da capacidade produtiva, tamanho e disposição dos seus componentes, o controle do sistema pode ser implementado em diversas configurações. No caso de pequenas células produtivas, em que se tem poucos dispositivos, o controle pode ser facilmente integrado no dispositivo de atuação ou controle, como por exemplo, no caso de um robô manipulador. Nesta situação o controle de eventos é seqüencial e bem definido; para o caso da implementação da comunicação com outros controladores as interfaces e os algoritmos de controle são implementados nos próprios dispositivos. Em células com uma complexidade maior, contendo um maior número de dispositivos e periféricos, o controlador da célula deve ser implementado como um controlador superior, tendo prioridade sobre os controladores individuais de cada dispositivo. Vários fabricantes oferecem diferentes tipos de controladores para sua gama de produtos. No caso da implementação de uma estrutura heterárquica (distribuída) de controle, todos os controladores ou dispositivos encontram-se no mesmo nível hierárquico e entre eles “cooperam” para tentar aperfeiçoar o sistema como um todo. Neste caso pela utilização de produtos de diferentes fabricantes pode não ser possível estabelecer uma comunicação entre os eles. São utilizados para estas aplicações diversos tipos de controladores, desde um PLC até computadores dedicados ao controle do processo.

Neste trabalho são explorados os sistemas flexíveis de manufatura com estrutura hierárquica, onde se tem uma entidade superior a qual se encarrega das decisões de alocação e liberação de recursos de um nível imediatamente inferior; neste caso segue-se à estrutura “ERP – Coordenação de Roteamento - Sistema Supervisório – Controladores de Células”.

O nível ERP encarrega-se de determinar a seqüência da produção a ser executada, especificando a quantidade, ordem e tipos de produto a processar. O nível Coordenação de Roteamento encarrega-se de controlar o uso de recursos, células de processamento e rotas da planta, utilizando a informação proporcionada pelo ERP referente à seqüência que cada produto deve seguir. Este nível interage constantemente com o nível Supervisório trocando informações referentes a evolução sequencial dos eventos para a tomada de decisões de roteamento. O nível Supervisório encarrega-se de restringir o comportamento do sistema, ocupando-se de especificações de segurança e seqüenciamento. Finalmente os Controladores de Células realizam efetivamente a captura de eventos e a execução de comandos na planta.

## Capítulo 3

### Fundamentação Teórica

A representação e modelagem de um sistema dinâmico de manufatura, ou de um sistema mecatrônico, segundo De Negri (2004), pode ser feita basicamente sobre três perspectivas:

- Funcional: Estabelece a função de cada componente no sistema e define a inter-relação destas funções;

- Estrutural: Representa os componentes de um sistema e as relações que interligam uns aos outros, indicando troca de materiais, informações, estrutura hierárquica, etc;

- Comportamental: Informa quando e como as funções de um sistema serão executadas. As características de modelos comportamentais dependem do tipo de sinais de entrada e saída que determinam a evolução do sistema, podendo ser classificados em: modelos a estado contínuo e modelos a estado discreto (Barbosa, 2005).

Para sistemas de manufatura automáticos, o comportamento e evolução dos sistemas podem ser observados e analisados deste o ponto de vista de sinais contínuos e discretos, para os quais diferentes ferramentas de análise e representação são utilizadas. Para a representação e modelagem comportamental em que a mudança dos sinais de entrada-saída no tempo determina a evolução do sistema, são utilizadas ferramentas matemáticas como equações diferenciais ou equações de estado. No caso de sistemas onde a passagem do tempo não é suficiente para determinar a sua evolução, mas é a ocorrência de eventos que a determina, é necessário utilizar outras ferramentas de modelagem e representação.

Um Sistema a Eventos Discretos (SED) pode ser definido como um sistema dinâmico cuja mudança de estado ocorre em pontos discretos do tempo, em decorrência de eventos isolados (Ramadge e Wonham, 1989). Um evento é um estímulo externo ou interno ao sistema, o qual provoca uma mudança na evolução do sistema.

Estes sistemas são tipicamente representados por um conjunto de estados unidos por transições. São representados tanto os eventos controláveis quanto os não-controláveis numa célula ou processo de manufatura (Lauzon, 1999). Segundo a Teoria de Controle Supervisório (Ramadge e Wonham, 1989) um evento controlável pode ser definido como um evento sobre o qual uma entidade de controle tem poder de impedir a sua ocorrência, por exemplo, o início de uma operação. Por outro lado, um evento não-controlável é definido como um evento sobre o qual a entidade de controle não possui a capacidade de impedir a sua ocorrência, por exemplo, uma decisão de um usuário externo, ou uma finalização de um comando.

Existem diversas ferramentas que podem ser utilizadas para a análise, representação e síntese de controladores para este tipo de sistemas, como por exemplo: Redes de Petri, Cadeias de Markov, Teoria das Filas, Processos Semi-Markovianos Generalizados e Simulação, Álgebra de Processos, Álgebra Max-Plus, Lógica Temporal, Teoria de Linguagens e Autômatos. Cada uma destas ferramentas apresenta características especiais dependendo de qual seja o ponto de interesse a analisar nos sistemas de manufatura.

É utilizada a teoria de linguagens e autômatos para a modelagem do sistema, para atender especificações de segurança e seqüenciamento. A teoria é escolhida pelo fato de oferecer certas características desejadas ao analisar e gerar controladores para os sistemas a analisar. Esta teoria utiliza formalismos matemáticos, sendo possível efetuar a geração, verificação e otimização do controlador, o qual garante que desde que as especificações de controle tenham sido corretamente projetadas. De acordo com a TCS, a planta a controlar terá um comportamento otimizado (Benhabib, 1996); ela estará livre de bloqueios e de acordo com as especificações e requisitos desejados como capacidades, segurança, seqüenciamento, restrições físicas, dentre outros. Após a análise e síntese, o controlador da planta gerado atenderá corretamente todas as especificações definidas e será minimamente restritivo (Lauzon, 1999).

As Redes de Petri Coloridas são utilizadas para incluir determinismo na supervisão obtida utilizando a teoria de linguagens e autômatos. Um sistema flexível de manufatura interagindo com um sistema ERP recebe ordens de produção contendo a seqüência de fabricação para diferentes tipos de produtos em diferentes quantidades, para o qual o sistema de controle deve estar preparado. O controle gerado utilizando a teoria de linguagens e autômatos encarrega-se de gerenciar segurança e seqüenciamento, e o controle gerado utilizando as RPC encarrega-se de gerenciar o controle do roteamento e da execução correta

do roteiro de produção. Os fundamentos básicos das duas teorias utilizadas no trabalho são apresentados no presente capítulo.

### 3.1 Teoria de Linguagens e Autômatos.

Por ser uma abordagem formal, para a utilização da TCS é necessária a apresentação da fundamentação teórica que suporta a modelagem e concepção do sistema de supervisão e controle a implementar. São apresentadas as principais características, propriedades e alguns exemplos na utilização desta teoria, sendo que para uma melhor compreensão e investigação pode ser estudada a publicação de Cassandras e Lafortune (1999).

#### 3.1.1 Linguagens

Uma linguagem  $L$  sobre um alfabeto  $\Sigma$  pode ser definida como um conjunto de cadeias formadas por símbolos pertencentes a  $\Sigma$ . Pode ser definida a partir de uma linguagem, uma linguagem denominada marcada  $L_m$ , a qual é um subconjunto da linguagem  $L$ , com a característica de que as cadeias pertencentes a esta linguagem representam tarefas completas que o sistema representado pode realizar. Por exemplo, num processo de manufatura, a finalização de um processo de modificação de material, retorno ao estado inicial, estado de erro, representam cadeias de  $L_m$ , e todos os eventos possíveis na planta fazem parte da linguagem  $L$ . Sobre uma ou mais linguagens podem ser realizadas diversas operações, como:

-Concatenação:

Para uma linguagem  $L1$  e  $L2$  pertencentes a um alfabeto  $\Sigma$ .

$$L1L2 = \{s \in L1, t \in L2, u = st, u \in \Sigma\}$$

A palavra  $u$  resulta da concatenação de  $s$  e  $t$ , pertencentes às linguagens  $L1$  e  $L2$ , respectivamente.

-Prefixo-Fechamento:

Uma seqüência de símbolos que constituem a parte inicial de uma palavra é denominada de prefixo.

Para uma linguagem  $L1$  pertencente a um alfabeto  $\Sigma$ .

$$\bar{L} = \{s \in \Sigma \mid \exists t \in \Sigma(st \in L)\}$$

Assim o conjunto prefixo fechamento define-se como o conjunto de todos os prefixos das palavras da linguagem em questão.

Formalmente denota-se como:

$$\bar{L} \subseteq L, \text{ o qual indica que uma linguagem esta contida no seu prefixo-fechamento.}$$

-Fechamento Kleene:

Para uma linguagem  $L1$  pertencente a um alfabeto  $\Sigma$ .

$$\Sigma^* = \{\varepsilon, \alpha, \beta, \chi, \alpha\beta, \alpha\chi, \alpha\beta\chi, \alpha\alpha, \dots\}$$

Assim, o fechamento Kleene representa todas as cadeias possíveis dentro de um alfabeto, incluindo a cadeia vazia.

Utilizando a teoria de linguagens e todas suas propriedades, observa-se que é possível modelar um SED em que os possíveis eventos no sistema são representados por um alfabeto  $\Sigma$ , sendo assim possível aplicar todas as propriedades e ferramentas de análise de linguagens ao sistema a eventos discretos modelado.

### 3.1.2 Autômatos

Um autômato pode ser visto simplesmente como o elemento que gera e representa uma linguagem pela manipulação de um alfabeto, de acordo com um conjunto específico de regras. A estrutura formal de um autômato pode ser representada por

$$G = (X, \Sigma, f, x_0, X_m)$$

Têm-se:

$G$  é chamado de autômato;

$\Sigma$  representa um alfabeto finito de símbolos, os quais são chamados de eventos;

$X$  representa o conjunto de estados;

$f$  representa a função de transição, sendo  $f : X \times \Sigma \rightarrow X$ ,  $x_0$  representa o estado inicial do sistema,  $X_m$  representa o subconjunto de estados marcados onde  $X_m \subseteq X$  (Wonham 2003).

A Figura 3.1 representa um autômato com dois estados (0 e 1) e dois eventos (“ $\alpha$ ” e “ $\beta$ ”).

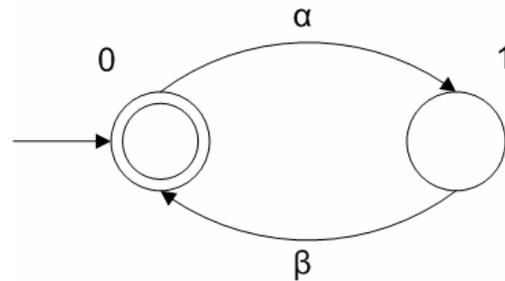


Figura 3.1: Diagrama de transição de estado.

Considerando num autômato todos os caminhos possíveis que podem ser seguidos desde o estado inicial, e, dentre estes, selecionando todos os caminhos que finalizam num estado marcado, pode-se ter a noção de como um autômato gera linguagens; neste caso respectivamente as linguagens gerada e marcada (Cassandras e Lafortune, 1999). A expressão formal que representa esta relação é:

Para uma linguagem  $L$  definida sobre um alfabeto  $\Sigma$ , tem-se  $L_m(G) \subseteq \overline{L_m(G)} \subseteq L(G) = \overline{L(G)} \subseteq \Sigma^*$ .

### 3.1.3 Propriedades dos Autômatos

Como visto anteriormente, um autômato  $G$  é a representação de duas linguagens,  $L(G)$  e  $L_m(G)$ . Sendo uma representação de linguagens, o autômato possui propriedades e operações que o relacionam as suas linguagens; sendo estas:

-Equivalência

Dois autômatos  $G_1$  e  $G_2$  são equivalentes se:

$$L_{G_1} = L_{G_2} \text{ e } L_{G_1}^m = L_{G_2}^m$$

### -Bloqueio

Um autômato possui a característica de ser bloqueante quando:

$$\overline{Lm(G)} \subset L(G)$$

### -Acessibilidade

Um autômato  $G$  possui a característica de ser acessível se todo  $x \in X$  é acessível, ou seja, todo estado é acessível desde o estado inicial, com a ocorrência de uma seqüência de eventos pertencentes ao alfabeto  $\Sigma$ .

Formalmente representa-se:

$$\text{Seja } G = (X, \Sigma, f, x_0, Xm), \quad x = x \in X : \exists s \in \Sigma (f(x_0, s) = x)$$

### - Co-acessibilidade

Um autômato  $G$  possui a característica de ser co-acessível ou não bloqueante se sempre for possível alcançar um estado marcado partindo de qualquer outro estado, com a ocorrência de eventos pertencentes ao alfabeto  $\Sigma$ .

Formalmente tem-se:

$$\overline{L(G)} = L_m(G)$$

### - Trim

Um autômato é TRIM se este for simultaneamente acessível e co-acessível.

Existem diversas operações possíveis que podem ser realizadas com autômatos, neste trabalho será apresentada apenas a composição síncrona; as demais operações podem ser consultadas no Cassandras e Lafortune (1999).

### - Composição síncrona

A composição síncrona é definida formalmente por:

$$\text{Seja } G = (X, \Sigma, f, x_0, Xm) \text{ e } G_1 = (X_1, \Sigma_1, f_1, x_{01}, Xm_1)$$

$$Gp = (G \parallel G_1) = ((X \times X_1), (\Sigma \cup \Sigma_1), f, (x_0, x_{01}), (Xm, Xm_1))$$

A função de transição de estado é definida em:

$$f_g = (X \times X_1) \times (Xm \times Xm_1) \rightarrow (X \times X_1)$$

A composição síncrona entre dois autômatos estabelece que a ocorrência de eventos no autômato resultante somente será possível se for possível nos dois autômatos ao mesmo tempo; eventos independentes entre os autômatos poderão ocorrer sempre que possível.

### **3.2 Teoria de Controle Supervisório**

Como mencionado anteriormente, para sistemas de manufatura, podem ser utilizadas varias abordagens. A Teoria de Controle Supervisório (Ramadge e Wonham, 1989) em especial chama a atenção e destaca-se por algumas características bastante desejáveis no projeto de controladores para estes sistemas. A utilização desta abordagem permite a síntese automática de supervisores que atendem de forma menos restritiva possível as especificações de controle.

Utilizando os formalismos da teoria de linguagens e autômatos, observa-se que o comportamento dos componentes de um sistema automático de manufatura pode ser abstraído, para assim obter modelos de cada componente deste, e o comportamento global do sistema será obtido pela composição síncrona ou produto síncrono de todos os modelos abstraídos.

#### **3.2.1 Supervisores**

Na representação e análise e projeto de controladores de um sistema automático de manufatura utilizando, a TCS pressupõe a modelagem dos subsistemas que compõem a planta as especificações que representam as restrições a serem impostas. É realizado o modelo do comportamento permissível da planta ou modelo comportamental em malha aberta, o qual reflete todas as possíveis ações que um subsistema pode executar, sem nenhuma restrição de comportamento (exceto as restrições físicas). A modelagem do comportamento desejado destes subsistemas – especificações – é realizada, a qual representa a supervisão e controle; os modelos são encarregados de permitir ou restringir ações no modelo comportamental em malha aberta. O procedimento de síntese se dá a partir destes dois modelos, resultando num modelo do comportamento desejado.

### 3.2.2 Controle Monolítico

A abordagem de síntese de controladores monolíticos caracteriza-se por se ter um único controlador sintetizado de todas as especificações desejadas para a planta, e um único modelo para o comportamento em malha aberta da planta a supervisionar. O controlador sintetizado será o único encarregado da desabilitação de eventos na planta.

A abordagem é representada na figura 3.2:

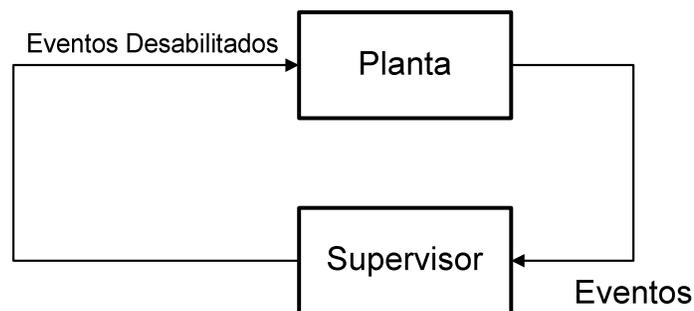


Figura 3.2: Controle Monolítico

Esta abordagem pode ser definida como a base da Teoria de Controle Supervisório; tem-se um único supervisor o qual tem uma visão de todos os eventos que podem ocorrer na planta, e ele é a única entidade que possui o controle e visão total da planta. Uma desvantagem no uso desta abordagem é que, na composição dos modelos dos subsistemas em autômatos, o número de estados do modelo global cresce exponencialmente com o número de modelos envolvidos. Da mesma maneira para a síntese do supervisor do sistema obter-se-á um número elevado de estados pela composição de todas as especificações.

O esforço computacional e de projeto requerido para este tipo de modelagem é considerado alto, muitas vezes não suportado pelas ferramentas para a análise, operação e síntese automática de controladores atualmente disponíveis. O tamanho do supervisor monolítico obtido dificulta ou até impossibilita a implementação do controle. Como exemplos de barreiras para a aplicação deste tipo de abordagem podem ser mencionados que a memória dos controladores lógicos programáveis disponíveis muitas vezes não é suficiente e o tempo de execução e implementação na programação do supervisor obtido é consideravelmente maior.

Utilizando a abordagem monolítica, as modificações de qualquer especificação ou de qualquer subsistema implicam praticamente no re-projeto e revisão do sistema de controle, sendo gasto um tempo e recursos computacionais consideráveis para realizar tais tarefas. Por esta razão, grupos de pesquisa procuram a utilização e concepção de novas abordagens que viabilizem a implementação da TCS em ambientes reais industriais.

### 3.2.3 Controle Modular Clássico

Com a finalidade de simplificar as tarefas de análise, síntese, projeto e possíveis modificações do sistema automático, foi desenvolvida por Ramadge e Wonham (1989) uma abordagem de controle modular, na qual é dividida a ação de supervisão do sistema em supervisores menores e menos complexos. Os supervisores modulares obtidos exercem a desabilitação de um evento na planta global quando um dos supervisores desabilita tal evento. A representação da abordagem modular clássica é apresentada na Figura 3.3.

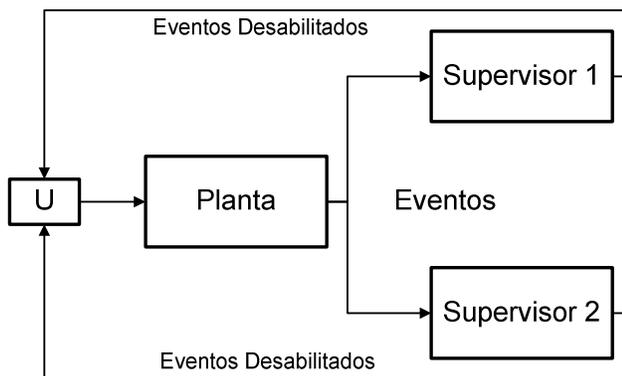


Figura 3.3: Controle Modular Clássico

Com a implementação da abordagem modular, facilita-se a modificação, atualização e correção da supervisão do sistema; se uma especificação for modificada, unicamente o supervisor correspondente deverá ser modificado. A supervisão modular possui a desvantagem de que cada supervisor possui uma visão restrita do sistema. Os supervisores modulares podem causar conflito na planta já que ações tomadas por um supervisor podem não ser reconhecidas por outro, assim causando, por exemplo, bloqueios ou *livelocks*.

### 3.2.4 Controle Modular Local

A abordagem de controle modular local introduzida por Queiroz e Cury (2002) objetiva melhorar a capacidade de utilização e implementação da Teoria de Controle Supervisório em sistemas automáticos de grande porte. Devido à explosão de estados que ocorre na composição de autômatos, como anteriormente comentado, a dificuldade de implementação do controle monolítico é evidente; com a introdução da abordagem modular local, é dado um grande passo para a implementação eficiente do controle obtido. A proposta explora a síntese de controladores em que cada supervisor modular atua unicamente sobre os subsistemas afetados pelo seu controle. A representação da abordagem modular local é apresentada na figura 3.4.

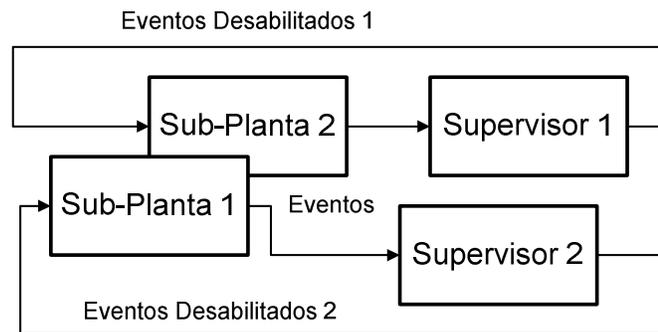


Figura 3.4: Controle Modular Local

### 3.2.5 Síntese de Supervisores Modulares

Na síntese de supervisores modulares, utiliza-se o conceito de Representação por Sistema Produto (RSP) (Ramadge e Wonham, 1989). Nessa, o sistema a modelar é dividido em subsistemas que não contém eventos em comum; por esta característica, estes subsistemas são denominados subsistemas assíncronos. O procedimento para a obtenção de uma RSP começa com a identificação dos subsistemas que contém eventos em comum. Em seguida, é realizada a composição síncrona entre estes subsistemas, resultando assim em subsistemas totalmente assíncronos e independentes uns dos outros. Na Figura 3.5 é ilustrado o procedimento descrito anteriormente.

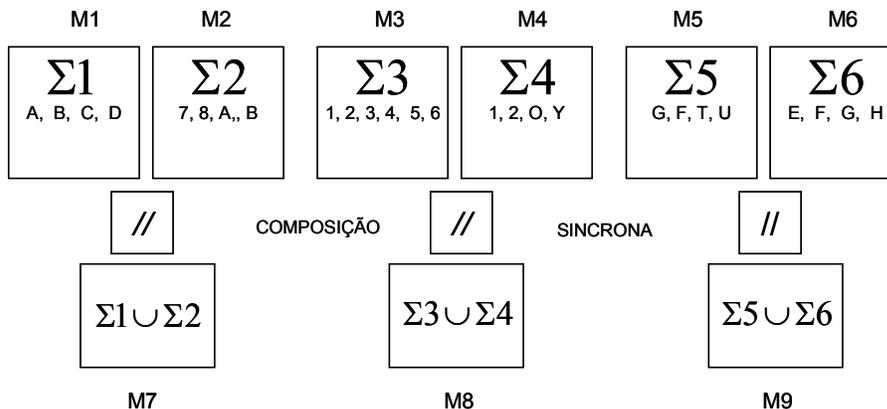


Figura 3.5: Sistema Produto

Na figura 3.5 têm-se os subsistemas (M1,M2),(M3,M4),(M5,M6), cujos respectivos alfabetos são  $\Sigma 1, \Sigma 2, \Sigma 3 \dots \Sigma 6$ , onde cada alfabeto é composto por um conjunto de símbolos tal que  $\Sigma n = \{a, b, c \dots z, 1, 2, 3 \dots 9\}$ . Cada par representa os subsistemas que possuem eventos em comum. Obtêm-se após a operação de composição sincrônica os subsistemas assíncronos M7, M8 e M9, os quais são subsistemas que não possuem eventos em comum, e portanto podem ser chamados de Módulos do Sistema Produto, e seus respectivos alfabetos resultam da união dos subsistemas envolvidos em cada composição.

Após obter-se a RSP é necessário estabelecer a relação destes sistemas com as especificações de controle da planta. Cada supervisor modular estará relacionado com uma planta local, a qual será o resultado da composição dos módulos pertencentes ao sistema produto que possuem eventos em comum com uma determinada especificação. Os autômatos resultantes destas composições são chamados de Plantas Locais. Este procedimento é apresentado na figura 3.6.

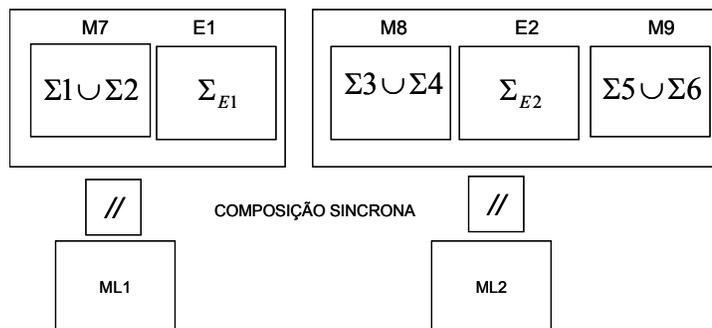


Figura 3.6: Síntese de Plantas Locais.

A figura 3.6 apresenta as especificações E1 e E2, que afetam respectivamente os módulos do sistema produto M7 e (M8, M9), ilustrados anteriormente na figura 3.5. Após a composição síncrona entre especificações e módulos, obtêm-se as plantas locais ML1 e ML2. A partir dos modelos das especificações e das plantas locais, aplica-se o procedimento de síntese dos supervisores estabelecido pela TCS. Após a síntese de supervisores, deve ser verificada a propriedade de modularidade; esta verificação é feita realizando a composição dos supervisores locais e comprovando que o supervisor resultante seja não bloqueante ou TRIM. Existe a possibilidade que esta propriedade não seja cumprida pelos supervisores obtidos, sendo necessário implementar técnicas de resolução de conflitos (Queiroz e Cury, 2002).

### 3.2.6 Arquitetura de Controle Supervisório

Objetivando a realização da abordagem modular numa estrutura organizada, o sistema de controle é programado em três níveis hierárquicos (Queiroz e Cury, 2002), de acordo com a figura 3.7. Esta arquitetura, cuja dinâmica é explicada a seguir, pode ser implementada em linguagem de Controladores Programáveis (IEC 61131-3, 1998), em linguagens de PC (C, Java) ou mesmo diretamente em hardware (circuito elétrico, pneumático ou hidráulico).

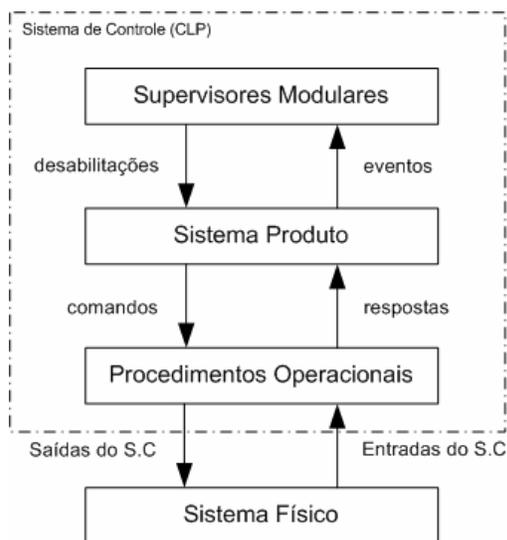


Figura 3.7: Arquitetura de Controle Supervisório (Queiroz e Cury, 2002)

O nível dos Supervisores Modulares (SM) é implementado exatamente como concebido na abordagem proposta por Ramadge e Wonham (1989). O programa atualiza os

estados ativos de acordo com a estrutura dos geradores e com as mudanças de estado no nível do sistema produto. Um mapa de realimentação associa os estados ativos a um conjunto de sinais de desabilitação que controla o sistema produto.

O nível do Sistema Produto (SP) tem como principal função executar os comandos que são permitidos e não são desabilitados pelo supervisor. A evolução paralela dos subsistemas assíncronos segue os comandos e respostas do nível das seqüências operacionais, sinalizando então as mudanças de estado para os supervisores. O programa necessita garantir que a ação dos supervisores modulares seja sempre atualizada antes de uma nova transição ocorrer no sistema produto. Este cuidado evita o envio de mais de uma mudança de estado para os supervisores instantaneamente.

O nível Procedimentos Operacionais (SO) trabalha como uma interface entre o Sistema Produto teórico e o sistema real. Neste nível, o programa interpreta os comandos abstratos como seqüências lógicas que guiam a operação de cada subsistema particular. Este nível mais baixo de controle gera os sinais de saída e lê os sinais de entrada, fornecendo ao sistema produto respostas lógicas que refletem a ocorrência de eventos não controláveis.

Durante a etapa de modelagem do sistema físico é recomendado realizar uma abstração dos detalhes de implementação tecnológica das diversas atividades e funções realizadas pelo sistema físico. Este detalhamento é realizado no nível das Seqüências Operacionais, possivelmente através de um *Sequential Function Chart* (SFC) (IEC 848, 1988). Os *comandos* recebidos pelas seqüências operacionais estarão relacionados às transições do SFC, e às *respostas*, enviadas pelas mesmas, estarão relacionadas a ações do SFC.

### **3.3 Redes de Petri Coloridas**

Originalmente o conceito de redes de Petri foi desenvolvido por Carl Adam Petri na sua dissertação (Petri, 1962) submetida à faculdade de matemática e física na Universidade Tecnológica de Darmstadt. As redes de petri são uma ferramenta matemática e de modelagem aplicável a diversos sistemas. É uma ferramenta que permite a descrição e estudo de sistemas de informação que apresentam as seguintes características: São sistemas concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos. Como ferramenta gráfica as redes de petri podem ser utilizadas como auxílio visual na representação de diagramas de fluxo, digramas em bloco ou redes. São utilizadas fichas para representar o

comportamento dinâmico e atividades concorrentes do sistema. Como ferramenta matemática, por exemplo, podem ser utilizadas equações de estado e equações algébricas dentre muitas opções de modelagem matemática possíveis as quais governam o comportamento do sistema modelado (Murata, 1989).

As Redes de Petri Coloridas (RPC) é uma linguagem gráfica para o projeto, especificação, simulação e verificação de sistemas. A ferramenta é particularmente útil para o estudo de sistemas onde a comunicação, sincronização e compartilhamento de recursos são relevantes (Jensen, 1992). O desenvolvimento das redes de petri coloridas nasceu do desejo de se desenvolver uma linguagem de modelagem que possuísse uma forte fundamentação formal e uma versatilidade que permitisse a utilização em projetos comumente encontrados na indústria. Foram combinadas as pontencialidades das linguagens de programação e das redes de petri. As redes de petri proporcionam primitivas para a descrição da sincronização de processos concorrentes, e a linguagem de programação proporciona as primitivas e a capacidade de descrição, definição e manipulação de tipos de dados e seus valores (Jensen, K. 1992). Algumas características das RPC são apresentadas:

- As RPC possuem uma representação gráfica, esta apresentação é intuitiva e dá à ferramenta um maior potencial. Esta representação assemelha-se a diagramas de fluxo ou à representação física dos sistemas modelados, facilitando a sua interpretação. A representação gráfica de lugares, estados, ações, fluxo de informação são bem apresentadas e aproveitadas pelas RPC;

- As RPC possuem uma semântica formalmente definida, a qual permite que o comportamento de um sistema modelado seja definido sem nenhum tipo de ambigüidade. A maioria de linguagens descreve estados ou eventos, em contraste as RPC formal e explicitamente descrevem tanto estados quanto eventos. A semântica definida também permite a implementação de simuladores, interpretadores de código e métodos formais de análise e estudo;

- As RPC é uma ferramenta que pode ser utilizada para a representação e estudo de uma grande e variada quantidade de sistemas. Podem ser utilizadas para a representação de sistemas de produção, com muitos recursos concorrentes, até para representar algoritmos seqüenciais simples;

- As RPC possuem diversas ferramentas computacionais de representação, análise formal e simulação. Esta característica possibilita a concepção e estudo de modelos de grande tamanho e complexidade. Existem também ferramentas computacionais para a análise formal

do modelo como grafos de alcançabilidade, cálculos e interpretação de invariantes do sistema, reduções e verificações de propriedades, facilitando a verificação e possíveis mudanças e estudos do sistema.

Uma RPC formalmente é definida como uma n-tupla. A definição formal de uma RPC é utilizada para evitar definições ambíguas da RPC e de sua semântica, assim como para formular definições gerais e provar teoremas. Na prática, uma RPC sempre deverá ser descrita como um grafo (Jensen, 1992). Uma RPC é formalmente definida como  $CPN = \{\Sigma, P, T, A, N, C, G, I\}$  em que:

-  $\Sigma$  representa um conjunto finito de tipos chamados conjunto de cores ou tipos ( ). O conjunto de cores ou tipos determina os valores de dados e as operações e funções que podem ser utilizadas nas expressões da rede;

-  $P$  representa um conjunto finito de lugares;

-  $T$  representa um conjunto finito de transições;

-  $A$  representa um conjunto finito de arcos, tal que  $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$ . Os conjuntos  $P, T, A$  são necessariamente finitos, desta maneira evita-se uma série de problemas técnicos tais como a possibilidade de ter um número infinito de arcos entre dois nodos.

-  $N$  representa a função nodo, definida a partir de  $A$  em  $P \times T \cup T \times U$  função mapeia cada arco a um par de elementos, onde o primeiro elemento é o elemento de origem e o segundo é o elemento destino. Os dois nodos devem ser necessariamente de tipos diferentes (um lugar e uma transição);

-  $C$  representa a função cor, definida a partir de  $P$  em  $\Sigma$ . A função mapeia cada lugar,  $p$ , a um  $typeC(p)$ . Cada ficha em  $p$  deve ter um valor que pertença a  $C(p)$ ;

-  $G$  representa a função *guard*, definida a partir de em expressões tal que

$\forall t \in T : [Type(G(t)) = boolean \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma]$ . A função mapeia cada transição a uma expressão booleana onde todas as variáveis pertencem a  $\Sigma$ ;

-  $E$  representa a função expressão de arco, definida a partir de  $A$  em expressões tal que  $\forall a \in A : [Type(E(a)) = C(p)_{ms} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$ , onde  $p$  é o lugar de  $N(a)$ . A função mapeia cada arco  $a$  a uma expressão do tipo  $C(p)_{ms}$ . Cada expressão de arco deve resultar em multi-sets do tipo do lugar adjacente ;

-  $I$  representa a função inicialização, definida a partir de numa expressão tal que

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

Em conjunto com a definição formal da RPC existe a semântica utilizada para definir os elementos que são utilizados na definição formal de uma RPC a qual é necessária para a não existência de ambigüidades na construção dos modelos.

- Os elementos de um tipo  $T$ . O conjunto de todos os elementos em  $T$  é denotado pelo nome  $T$ ;

- O tipo de uma variável,  $v$ . Denota-se como  $Type(v)$ ;

- O tipo de uma expressão,  $expr$ . Denota-se como  $Type(expr)$ ;

- O conjunto de variáveis numa expressão  $expr$ . Denota-se como  $Var(expr)$ ;

- A ligação (*binding*) de um conjunto de variáveis,  $V$ , associando com cada variável  $v \in V$  um elemento  $b(v) \in Type(v)$

- O valor obtido pela avaliação de uma expressão,  $expr$ , numa ligação,  $b$  – denotada por  $expr < b >$ . É necessário que  $Var(expr)$  seja um subconjunto das variáveis de  $b$ , e a avaliação é realizada substituindo por cada variável  $v \in Var(expr)$  o valor  $b(v) \in Type(v)$  determinado pela ligação.

## Capítulo 4

### Concepção da Arquitetura de Controle Híbrida

A evolução dos sistemas de informação associado ao aumento da capacidade computacional e versatilidade operacional das máquinas têm proporcionado um alto grau de flexibilidade aos sistemas produtivos. Esta flexibilidade se traduz na capacidade de tais sistemas executarem modificações no transporte de materiais, mudanças dinâmicas nos roteiros de produção, inserção de produtos na linha e modificações de leiaute. Estas características exigem uma estrutura de controle complexa, a qual não pode ser baseada e obtida intuitivamente. Ao contrário, o projeto desta estrutura necessita de ferramentas formais tanto para síntese como para implementação.

No caso de um sistema onde o fluxo do processo produtivo é determinado e gerenciado por um sistema ERP, o controle de rotas, tempo de disparo da produção, estoque disponível e todas as informações que modifiquem algum parâmetro no processo, devem ser integrados com a supervisão do sistema para que as definições de regras comportamentais para a planta sejam seguidas de acordo com cada produto e o processo produtivo seja tão eficiente quanto possível, utilizando ao máximo os recursos de flexibilidade que cada sistema oferece.

Para a concepção da estrutura de controle para sistemas flexíveis de manufatura, os sistemas são observados desde dois pontos de vista diferentes, dependendo do tipo de controle que é necessário estabelecer. Esta divisão resulta natural e complementar para a estrutura de controle proposta, resultando em dois diferentes níveis de controle bem definidos:

- Nível de Controle da produção (Coordenação de Roteamento): Estrutura que trata do controle do sistema de manufatura sob o ponto de vista do produto. A partir de informações obtidas do Planejamento Mestre de Produção (proveniente do ERP), o sistema de controle sabe quantos produtos, quais tipos e em que ordem a execução da produção deve ser executada para cada um deles. Este nível é encarregado da seqüência de produção que cada

produto deve seguir e seu fluxo pela planta física, observando e assegurando-se que esta ordem seja cumprida;

- Nível de Supervisão: Estrutura que trata do controle do sistema físico de produção. É encarregado de garantir que as operações executadas pela planta cumpram todas as especificações de segurança, execução e seqüenciamento estabelecidas. O nível supervisão é encarregado de efetivamente realizar as ações de controle sobre a planta, encontrando-se em constante comunicação com o nível de controle da produção para que a execução das seqüências de produção respeite sempre as condições de segurança e seqüenciamento estabelecidas para a planta.

A arquitetura de controle utilizada no presente trabalho é baseada no arquitetura proposta por Queiroz e Cury (2002), sendo estendida para adicionar o nível de interação com o planejamento e controle da produção baseado no formalismo de RPC. Esta arquitetura é apresentada na Figura 4.1. Os níveis do modelo proposto por Queiroz e Cury (2002), Supervisores Modulares, Sistemas Produto e Procedimentos Operacionais, realizam o controle baseado na TCS e na abordagem modular local. Essa parte da arquitetura global trata basicamente dos requisitos de segurança e seqüenciamento dos subsistemas que constituem a planta.

De acordo com a TCS, presume-se que a planta gera eventos espontaneamente e que o supervisor somente poderá afetar seu comportamento através da desabilitação de certos eventos (controláveis). Além dessa característica, o supervisor obtido é minimamente restritivo, sendo possível a ocorrência de mais de um evento controlável na estrutura de transição do autômato que o representa. A TCS não prevê qual evento ocorrerá de fato, dentre alguns possíveis. Este aspecto torna-se particularmente importante quando é necessário escolher, de acordo com certos critérios, qual dos eventos deve acontecer (dentre aqueles permitidos).

De acordo com Gouyon et al. (2004), espera-se que um sistema de controle force a ocorrência de algum evento, e não apenas habilite-o ou desabilite-o. No caso de sistemas de manufatura com possibilidade de diversos roteamentos, esse problema torna-se relevante, uma vez que a decisão de qual trajetória determinado produto deve seguir necessariamente é estabelecida pelo sistema de controle. No nível supervisão obtém-se um sistema de controle que não trata estas decisões, unicamente cuidando de segurança e seqüenciamento. Mais de um evento controlável referente ao roteamento ou ações de modificação de produto pode se encontrar habilitado para acontecer num determinado instante de tempo, e se as ações de

controle forem unicamente tratadas pelo nível supervisão, estes eventos podem acontecer aleatoriamente. É necessária uma estrutura de controle adicional para o tratamento e desabilitação destes eventos controláveis não tratados pela supervisão, para que a ordem de produção seja corretamente executada.

A figura 4.1 apresenta um exemplo onde é visível a situação apresentada. A partir do estado inicial do autômato representando a estação de processamento, encontram-se habilitados os eventos  $d1$  e  $d2$ , os quais correspondem à decisão de executar dois diferentes programas para uma estação de processamento. De acordo com a figura 4.1, a estação é capaz de produzir dois diferentes tipos de processamentos, P1 e P2. Observa-se, pelo autômato correspondente ao supervisor, que o nível supervisão neste caso permitiria a execução dos dois processamentos. Uma decisão necessariamente deve ser tomada pelo sistema de controle para que, dependendo do tipo de produto na estação, seja executado o programa adequado. Esta decisão deverá ser implementada como desabilitações adicionais de eventos no nível supervisão.

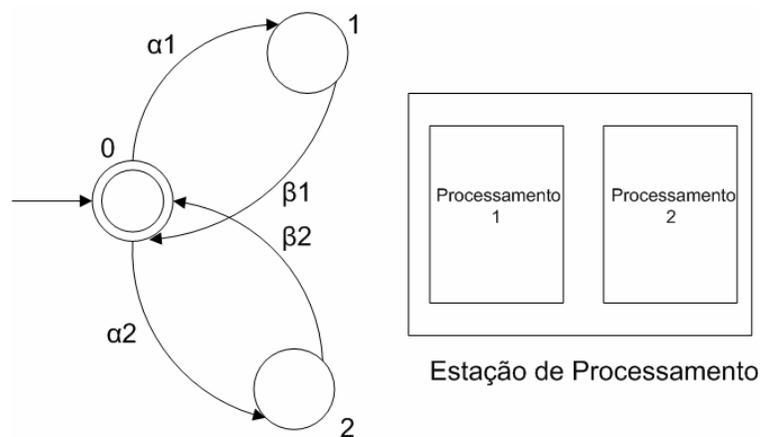


Figura 4.1 Exemplo de habilitação simultânea de dois eventos controláveis

Nesse sentido, propõe-se resolver este problema através da inserção de um nível denominado Coordenador de Roteamento (Figura 4.2). Este nível tem por objetivo fundamental definir possíveis trajetórias do produto, de acordo com informações oriundas de um nível superior (Planejamento e Controle da Produção – PCP). Estas informações são relacionadas às ordens de produção, tipo de produtos, atributos, dentre outras. A decisão de trajetórias é realizada através de desabilitações adicionais no nível Sistema Produto, uma vez

que é nesse nível que são gerados os eventos controláveis e os comandos associados às seqüências operacionais.

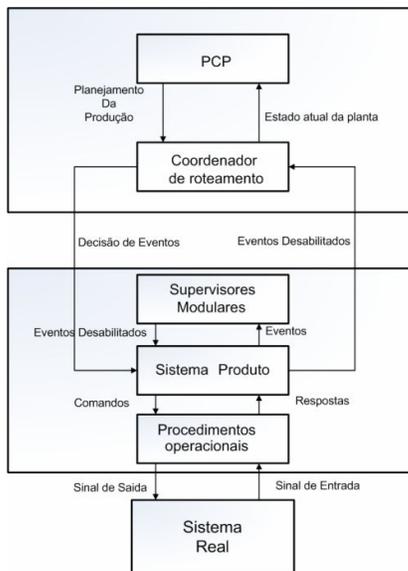


Figura 4.2: Estrutura híbrida de controle

As Redes de Petri Coloridas têm sido aplicadas na modelagem do comportamento dinâmico de sistemas de manufatura automatizados, sendo utilizadas na criação de estruturas de controle mais complexas, em que existe a necessidade de representação e manipulação de uma maior quantidade de informações do sistema tratado.

Em função da quantidade de informações a serem manipuladas, o nível de coordenação de roteamento é implementado utilizando Redes de Petri Coloridas. Esse nível utiliza informações de habilitação/desabilitação provenientes do sistema produto e informações provenientes da camada de planejamento da produção para, assim, tomar decisões de roteamento e execução de tarefas. Cada variável do modelo é constantemente atualizada e a evolução dos estados dos módulos do sistema produtos encontra-se disponível permanentemente para qualquer modificação por parte da camada de planejamento. O nível de coordenação de roteamento comunica-se com a camada do sistema produto, gerando desabilitações de eventos para a tomada de decisões.

Devido à complexidade dos sistemas flexíveis de manufatura e a complexidade da modelagem utilizando TCS, a abordagem proposta sugere que a etapa inicial do projeto do sistema de controle seja a obtenção do nível de supervisão, para o posterior projeto do nível de coordenação de roteamento e finalmente estabelecer a camada de comunicação.

## 4.1 Concepção do Nível Supervisório

A TCS trata da modelagem e do controle de Sistemas a Eventos Discretos (SED). Presume-se nesta teoria que o sistema (chamado planta), possui um comportamento não controlado, o qual pode violar algumas propriedades necessárias e desejadas (e.g: segurança). Este comportamento deve que ser modificado por meio de um controlador realimentado (supervisor) de forma que a planta tenha um comportamento que obedece a um conjunto determinado de requisitos (Ramadge & Wonham, 1989). Para realizar a ação de controle desejada, o supervisor atua na planta desabilitando alguns eventos e permitindo outros. Em geral nem todos os eventos podem ser desabilitados pelo supervisor. Formalmente, Um supervisor  $S$  é uma função  $S: L(G) \rightarrow 2\Sigma$  de uma seqüência de eventos gerados para o subconjunto de eventos controláveis a serem habilitados ou desabilitados pelo controle após a trajetória  $S \in L(G)$ . Particularmente, um supervisor não poderá desabilitar eventos não controláveis que ocorram na planta, o qual é formalizado pela definição de controlabilidade.

Na TCS, um conjunto de especificações  $E_j$  gera um supervisor que observa e controla toda a planta (abordagem monolítica). Com o propósito de se explorar a natural modularidade física dos sistemas de manufatura, Queiroz e Cury (2000) propõem uma extensão da abordagem modular ao inserir o conceito de Modularidade Local. Enquanto que nas abordagens monolítica e modular a planta é única, na abordagem modular local a planta é fragmentada em vários subsistemas, assíncronos entre si. Cada subsistema será representado por um autômato  $G_i$ , sendo  $i \in I = \{0, \dots, p\}$ . Define-se uma especificação local  $Eloc_j$ , obtida a partir da composição síncrona de uma especificação  $E_j$ , para  $j \in J = \{0, \dots, m\}$ , com a respectiva planta local  $Gloc_l, l \in L = \{0, \dots, w\}$ . Uma planta local é composta dos subsistemas  $G_i$  que compartilham eventos na elaboração de  $E_j$ , ou seja, têm o seu comportamento afetado pela especificação em questão. A síntese de um supervisor modular local  $Sloc_j$ , é realizada considerando a máxima linguagem controlável contida em  $\sup C(Eloc_j, Gloc_j)$ .

De acordo com a abordagem modular local, o comportamento em malha aberta dos diversos subsistemas (sem ações de controle sendo aplicadas) pode ser modelado com um conjunto de autômatos assíncronos (sem eventos em comum). Desta maneira, Queiroz e Cury

(2000) citam que é possível obter a representação do Sistema Produto, como foi apresentado no capítulo três. O procedimento necessário para a modelagem é apresentado:

1. Identificar o conjunto de subsistemas envolvidos no sistema de transporte e produção.
2. Construir o autômato  $G_i$  de cada subsistema  $i$ , tão sintetizado quanto possível. Devem-se representar necessariamente na construção do autômato todos os eventos controláveis relevantes para o controle de roteamento e produção (e.g: eventos para acionamento de atuadores que possam modificar a rota do produto).
3. Calcular a mais refinada Representação do Sistema Produto possível e efetuar a composição dos subsistemas síncronos.
4. Modelar cada especificação isolada, considerando unicamente os eventos relevantes.
5. Obter a planta local para cada especificação. É necessário realizar a composição dos subsistemas do Sistema Produto que possuem eventos em comum com uma determinada especificação.
6. Para cada planta local, calcular a linguagem que satisfaz a especificação. Realiza-se o produto síncrono entre cada planta local e sua respectiva especificação.
7. Calcular a máxima linguagem controlável contida em cada especificação local.
8. Nas linguagens resultantes, verificar a modularidade local.
9. Se a modularidade local é satisfeita, implementar um supervisor local para cada linguagem controlável.
10. Caso a modularidade local não seja satisfeita, é necessário tentar resolver o problema utilizando outra abordagem.
11. Uma vez sejam obtidos os supervisores modulares do sistema de controle desejado, prossegue-se a identificar os eventos controláveis que representem decisões ligadas ao tipo do produto a ser processado, e.g: eventos onde se decidem mudanças de roteamento ou ações de modificação de produto. Os eventos identificados serão incluídos no modelo do coordenador de roteamento.

## **4.2 Concepção do Coordenador de Roteamento**

Num sistema de controle gerenciado por um ERP que possui diferentes roteiros de produção possíveis para diferentes tipos de produto, são necessárias decisões de roteamento constantes. Inserir determinismo em qualquer modelo escolhido é uma necessidade. O formalismo de RPC permite desenvolver um modelo matematicamente fundamentado e com propriedades para descrever e acompanhar o processo a modelar. É proposta uma estrutura de controle genérica, a qual permite a modelagem, acompanhamento e simulação de um processo produtivo no qual exista a necessidade da toma de diferentes decisões de roteamento baseadas nas características de cada produto ou elemento.

### **4.2.1 Processo de modelagem**

Utilizando o formalismo de RPC é necessário estabelecer as variáveis de ambiente necessárias para a definição formal da RPC. É definida uma estrutura básica de controle que é replicada quantas vezes sejam necessárias de maneira que todos os processos de comunicação e as decisões de controle que devem ser tomadas pelo coordenador de roteamento sejam explicitamente modelados e representados. Observa-se que muitas vezes o modelo reflete ou assemelha-se em grande parte ao layout físico do sistema a modelar. Um exemplo da modelagem e da estrutura básica é apresentado na figura 4.3. Um determinado produto é transportado a partir de P1 através de uma seqüência de esteiras transportadoras. Num determinado momento, o atuador A1 encarrega-se do desvio dos produtos a bifurcação apresentada, o qual representa uma decisão de roteamento. Observa-se que a estrutura da rede representa fiel e claramente o fluxo do produto e os lugares onde decisões de roteamento devem ser tomadas - decisão de rota, no caso do lugar-transições P2-T2-T3, e decisões de processamento no conjunto lugar-transições P3-T4-T5 e P4-T6-T7.

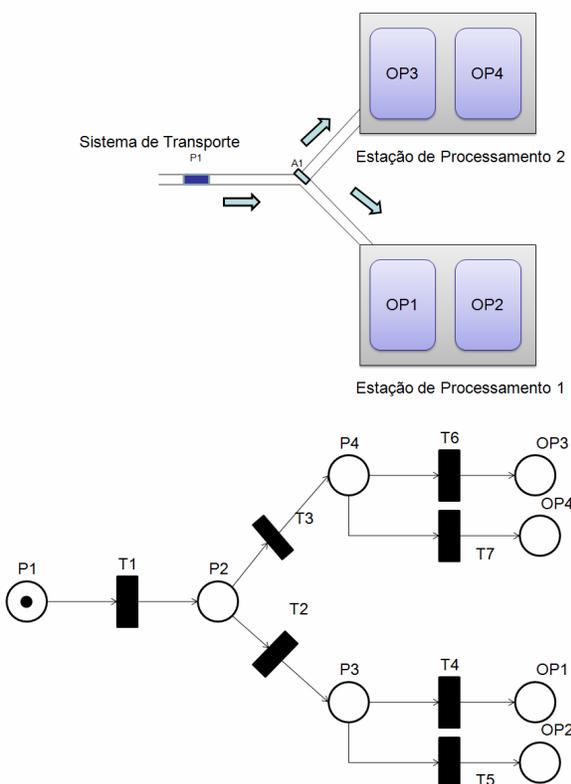


Figura 4.3. Exemplo de estrutura de rede para a coordenação de roteamento e processamento.

O coordenador de roteamento recebe informações do nível do Planejamento e Controle da Produção (PCP) informando a quantidade, ordem de produção e seqüência específica de cada produto. É necessário estabelecer uma ligação entre o nível PCP e o nível de coordenação de roteamento. O modelo em RPC deve reconhecer e converter os produtos a serem processados obtidos pela interação com o ERP em fichas que trafegam pela rede.

Uma ficha na rede identifica um único produto, sendo que em cada ficha são definidas as seqüências de produção e um índice que é utilizado para controlar qual é a próxima operação do roteiro a ser executada. A seqüência de produção especifica o processamento que cada ficha deve realizar na planta, assim, baseadas nesta seqüência, as transições determinam o fluxo das fichas na planta. É definida uma cor para representar a seqüência de produção de cada produto, uma cor do tipo inteiro para representar o índice da seqüência produtiva e finalmente uma cor para representar o produto, o qual é composto pela combinação das duas cores previamente definidas.

Para o coordenador de roteamento tem-se:

$$TypeROUTE = \{M_1, M_2 \dots M_n\}$$

$M_x$  representa a Máquina ou Estação que o produto deverá seguir

$$TypeINDEX = \{1, 2, 3 \dots n\}$$

Representa o índice da produção, indica o estado atual do produto.

$$TypePRODUCT = \{M_{x1}xINDEX_1, M_{x2}xINDEX_2, \dots, M_{xn}xINDEX_n\}$$

Representa a combinação das cores *ROUTE* e *INDEX* , resultando na definição

da cor *PRODUCT* .

$$TypeSTATES = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$$

Representa os estados (eventos controláveis) que trafegam entre o nível supervisão e coordenação.

A interação entre o nível PCP e a coordenação de roteamento deve obedecer a um determinado padrão de comunicação previamente estabelecido. O coordenador de roteamento (modelo em RPC) utiliza as entradas fornecidas pelo nível PCP para a criação das fichas que posteriormente representarão produtos e trafegarão pela rede. A lógica implementada na rede faz que esta entrada necessariamente obedeça ao padrão estabelecido para o correto funcionamento do modelo. A comunicação entre estes dois níveis pode ser implementada por uma infinidade de maneiras como, por exemplo, comunicação TCP/IP, bus industrial, leitura de arquivos, etc.

Após o estudo e implementação do método de comunicação entre o nível PCP e o coordenador de roteamento é necessário estabelecer o método de comunicação entre o nível Coordenação de Roteamento e Supervisão. Esta comunicação permite o aproveitamento das diferentes características oferecidas pelas duas abordagens de modelagem selecionadas. O nível Supervisão fornece para o nível Coordenação informações atualizadas do estado dos eventos controláveis da planta, e, após a atualização das variáveis de controle, o coordenador de roteamento considerando o tipo e roteiro de produção de cada produto e o estado atual da planta, toma a decisão e envia a informação dos eventos que deverão ocorrer ao nível Supervisão. A informação é interpretada pelo supervisor como ordens de desabilitação de eventos controláveis da planta. Na seqüência, o controle de roteamento é estabelecido, e o produto em questão segue a rota adequada levando em conta sempre às condições atualizadas da planta.

A requisição das variáveis de controle por parte do coordenador de roteamento deve ser sempre realizada antes de qualquer decisão por parte dele. O estado da planta deve ser sempre o mais atualizado possível, garantindo que as verificações por parte do coordenador sejam as mais confiáveis possíveis.

A estrutura de decisão utilizada para a modelagem do processo apresentada na figura 4.4 mostra que uma transição de atualização de informação (Rec) deve ser utilizada antes de um conjunto de lugares-transições de decisão (D1-Op1-Op2...Opn). Uma vez que a decisão por parte do coordenador é tomada, dependendo do tipo do produto e do estado dos subsistemas informados pelo nível supervisão, no arco de saída da transição disparada é executada a comunicação com o nível supervisão, atualizando o estado dos supervisores. É neste ponto que é enviada a ordem de desabilitação desejada aos supervisores e o evento correspondente a decisão tomada será efetivamente executado.

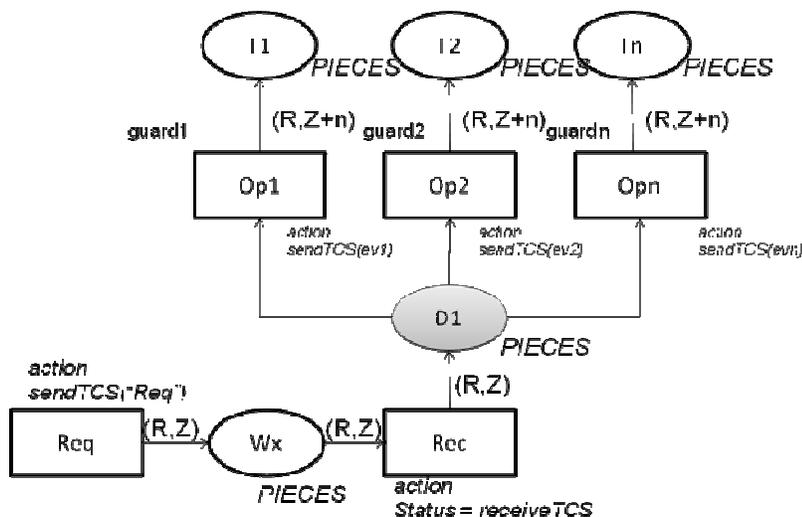


Figura 4.4 Estrutura básica de comunicação e decisão.

A estrutura básica de comunicação realiza uma requisição de atualização para o nível supervisão (representado pela transição Req) e, após receber a informação desejada, a ficha é posicionada em D1. É neste ponto que é realizada a tomada de decisão por parte do coordenador de roteamento. Ainda, dependendo do resultado dos *guards*, os quais devem ser mutuamente exclusivos, será realizada a atualização de estados da supervisão e a atualização ou não do índice do produto.

Os *guards* de verificação de rota são definidos de tal maneira que sempre é utilizada a informação da ficha corrente: a sequência de produção obtida do ERP e o índice. Esta informação sempre será utilizada em conjunto com um ou mais eventos do nível supervisão. Por exemplo, se o produto for do tipo  $x$  e o evento  $\alpha$  estiver habilitado, então a transição será habilitada e disparada, acionando imediatamente a atualização dos eventos no nível supervisão.

Para que a atualização dos estados dos supervisores seja executada, é necessário estabelecer uma interface de comunicação apropriada entre os dois níveis de controle. A interface deve oferecer capacidade para a transmissão e recepção de dados num formato previamente acordado entre os dois níveis para que as verificações, tomada de decisão e atualização de eventos seja executado de maneira adequada. O envio dos estados necessários por parte do nível supervisão é executado após a requisição do coordenador de roteamento, e após a decisão por parte deste, é enviada a atualização para o nível supervisão de qual ou quais estados devem ser desabilitados.

## Capítulo 5

### Modelagem e Ambiente Experimental

Para a implementação da proposta apresentada neste trabalho é utilizada a estrutura física do laboratório de Automação da Manufatura (LAS I), da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Este laboratório proporciona as ferramentas necessárias para a implantação de um processo produtivo de manufatura flexível completo.

#### 5.1 Estrutura Física do laboratório

-**Sistema de Transporte** - o sistema de transporte consiste em 28 metros de esteiras que transportam e direcionam os *pallets* entre as diversas estações do sistema. O Layout do sistema é apresentado na figura 5.1

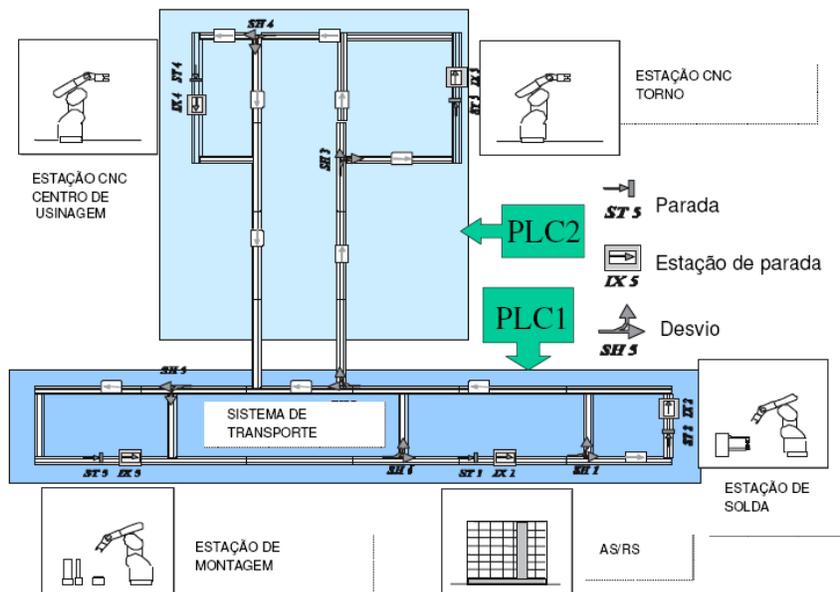


Figura 5.1: Estrutura e Layout do laboratório LAS1

**-Sistema de Armazenagem Automatizado (AS/RS)** - consiste em um controlador do sistema e uma estrutura de armazenagem com 40 posições, a qual é suprida por um manipulador cartesiano.

**-Célula Flexível de Montagem** - Composta por um controlador da célula, um robô de montagem Adept do tipo SCARA e um dispositivo de aquisição / processamento de imagens. Executa a montagem do produto final e faz o controle de qualidade visual do produto.

**-Célula Flexível de Soldagem** - Composta por um dispositivo de Solda MIG, um dispositivo de Solda Ponto, um robô de manipulação Comau com seis graus de liberdade e um controlador da célula. Executa a soldagem das caixas onde o produto final é embalado.

**-Célula Flexível de Usinagem de Peças Rotacionais** - Composta por uma estação de torneamento CNC, um controlador da célula e um robô de manipulação Mitsubishi com seis graus de liberdade que abastece a estação CNC. Executa a primeira etapa de usinagem do produto.

**-Célula Flexível de Usinagem de Peças Prismáticas** - Composta por uma estação de fresamento CNC, um controlador da célula e um robô de manipulação Mitsubishi com seis graus de liberdade que abastece a estação CNC. Executa a segunda etapa de usinagem do produto.

**-Protocolos de Rede** - toda a planta é controlada por uma diversidade de protocolos de redes industriais que são utilizados para fazer a comunicação de dados entre estes periféricos e o controlador central. Os principais protocolos de comunicação utilizados na

planta são: Ethernet, Profibus, Profibus FMS, Profibus DP, AS-Interface e I/O. [Página Apresentação LAS1]

## 5.2 Estrutura Física de Controle

A Figura 5.2 apresenta de forma gráfica a estrutura de controle físico implementada no laboratório LAS I, onde serão detalhadas principalmente as funções de Planejamento e controle da produção e Supervisão.

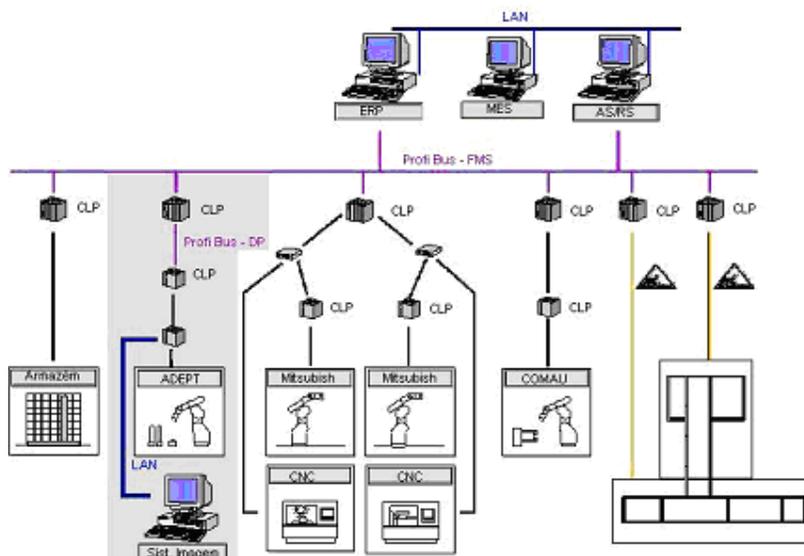


Figura 5.2: Estrutura Física de Controle

Observa-se no nível superior o controle da produção no ERP, a supervisão no MES e uma estação de trabalho dedicada para o controle do sistema de armazenamento; este nível representa o planejamento e controle da produção e a supervisão do sistema. Um nível abaixo se encontram os CLPs, os quais concentram as rotinas de execução de seqüências operacionais dos programas, recebendo a habilitação e desabilitação de eventos por parte da supervisão.

No ultimo nível estão os dispositivos de atuação e medição como Robôs, Máquinas CNC e o sistema de transporte, os quais são encarregados de efetivamente executar as operações do sistema produtivo.

### 5.3 Modelagem do Sistema Físico

Utilizando as teorias e abordagens previamente apresentadas, será modelada uma parte do sistema produtivo do Laboratório LAS I, sendo que pelas características do sistema modelado, os modelos são facilmente replicáveis e extensíveis para as demais partes do sistema.

Será modelada a primeira parte do sistema de transporte, com a qual se tem acesso às células flexíveis de soldagem, montagem e armazenamento, requerendo que estes processos sejam introduzidos no modelo para assim ter a representação completa do sistema produtivo.

O sistema de transporte consiste em correias transportadoras unidirecionais, onde os *pallets* dos produtos são transportados; a rota dos *pallets* é determinada por uma série de dispositivos localizados ao longo do sistema de correias, os quais detêm os *pallets* ou mudam a sua direção. O sistema pode executar diversas rotas de produção e ações de controle baseado nas especificações de manufatura e seqüência da produção.

Para conveniência na análise e modelagem, o sistema de transporte é dividido em segmentos. Um segmento é definido por dois dispositivos de parada sucessivos; os dispositivos podem ser: stoppers - ST, shunts - SH e clampers - IX. Cada um dos dispositivos é descrito em detalhe a seguir.

O stopper (ST), ilustrado na Figura 5.3, é um dispositivo encarregado de deter o avanço dos *pallet*. A chegada ou saída de cada *pallet* é detectada por um sensor de presença (representado pelo símbolo PS1); por definição todo *pallet* que chega a um stopper será sempre detido por um pino pneumático (PP1). Após as considerações de segurança, roteamento e controle, a supervisão determina se este *pallet* deverá ou não ser liberado para continuar sua rota determinada.

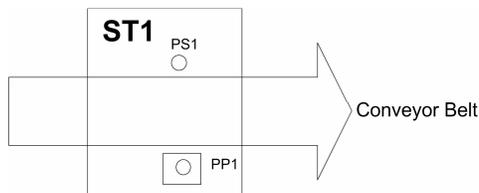


Figura 5.3. Stopper

Para cada estação de trabalho (Soldagem, AS/RS, montagem e usinagem), existe um dispositivo de prensagem (Clamper - IX), ilustrado na figura 5.4. Ele tem a função de fixar o

*pallet* para a correta e segura manipulação por parte das estações de trabalho. O dispositivo possui as mesmas características que um stopper mais o atuador de prensagem (PP1).

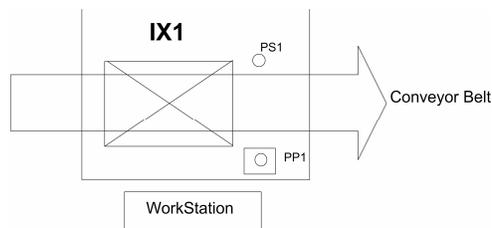


Figura 5.4. Clamper

O dispositivo shunt (SH), ilustrado na Figura 5.5, é responsável pelas mudanças de rota no sistema de transporte. É composto de um stopper (PP1) e um atuador (representado pelo símbolo AC), o qual direciona os pallets de acordo com o as especificações de segurança e roteamento para os caminhos disponíveis.

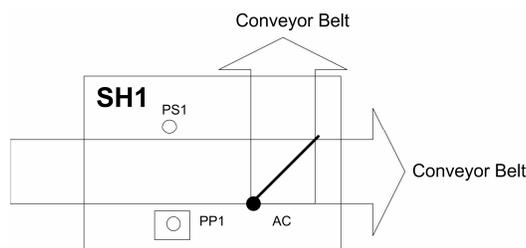


Figura 5.5. Shunt

Estes dispositivos representam os principais componentes do sistema de transporte, e suas configurações são facilmente replicadas para todos os segmentos existentes na planta.

Os modelos construídos e os supervisores sintetizados são projetados utilizando a abordagem de controle modular local (Queiroz e Cury, 2000). Seguindo esta abordagem, o sistema a ser modelado é dividido em subsistemas assíncronos entre si. O nível de abstração dos modelos deve necessariamente incluir todos os eventos relevantes para decisões de roteamento de manufatura. O sistema de manufatura foi modelado considerando as estações de trabalho e os segmentos do sistema de transporte.

Uma visão parcial do sistema a modelar na qual são definidos elementos do sistema de transporte é apresentada na Figura 5.6.

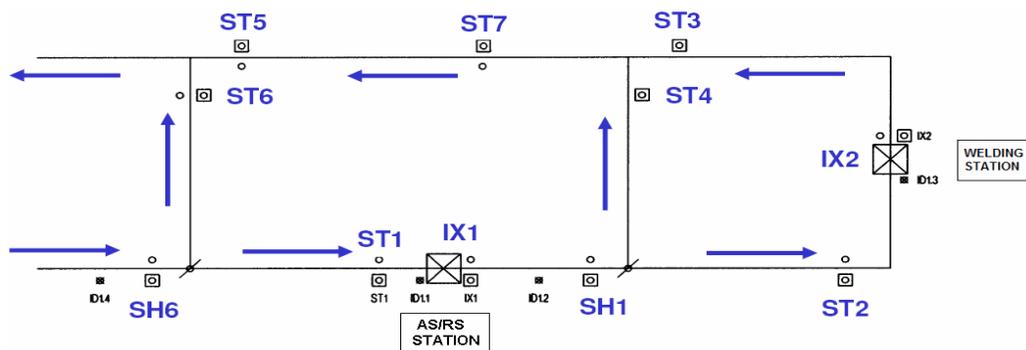


Figura 5.6. Vista Parcial do Sistema de transporte.

### 5.3.1 Modelagem do Nível Supervisão

Seguindo a abordagem modular local (Queiroz e Cury, 2000), é necessário identificar os subsistemas a modelar. É aproveitada a divisão do sistema de transporte e a existência de elementos de parada e direcionamento para estabelecer quatro subsistemas replicáveis na planta:

- Subsistema Tipo I: Subsistema definido por dois elementos de parada simples (*stoppers*) contíguos.
- Subsistema Tipo II: Subsistema definido por uma estação de trabalho, a qual é composta por uma máquina de processamento ou modificação de material ( $M_{i,t} = \{1, \dots, n\}$ ) e por um dispositivo *clamper* ( $IX_{i,t} = \{1, \dots, n\}$ ).
- Subsistema Tipo III: Subsistema definido por três dispositivos, um *Shunt* ( $SH_{i,t} = \{1, \dots, n\}$ ) e os dois *stoppers* imediatamente adjacentes. E.g :  $SH_1, ST_2, ST_4$ .
- Subsistema Tipo IV: Subsistema definido por três dispositivos de parada em junção (*joint*). E.g:  $ST_2, ST_4, ST_7$ .

Uma vez é realizada a identificação dos subsistemas é necessário realizar a modelagem e construção dos autômatos  $G_i$ . Especial cuidado deve ser tomado para a inclusão dos eventos relevantes para decisões de roteamento e modificação de material. A análise, síntese e minimização de supervisores são executadas utilizando a ferramenta Grail, desenvolvida pelo departamento de ciências da computação da Universidade de Western Ontario. A ferramenta é desenvolvida especificamente para a análise de máquinas de estados finitos, expressões regulares, e linguagens formais.

A tabela 5.1 apresenta a nomenclatura utilizada para a construção dos modelos para a planta.

Nomenclatura de eventos	Descrição do Evento	Controlabilidade
$a_x$	Ordem de saída do pallet. Ativado pelo acionamento do pino pneumático <b>P</b>	Evento Controlável
$b_x$	Chegada do Pallet ao dispositivo. Ativado pelo sensor de presença.	Evento não controlável
$al_x/ar_x$	Pallet é liberado com direcionamento (l = left, r = right) Ativado pelo acionamento do dispositivo shunt	Evento controlável
$u_x$	Confirmação de liberação de pallet. Ativado pelo sensor de presença	Evento não controlável
$k_x$	Clamp (Prensa) Ativado pelo acionamento do dispositivo presente nas estações de trabalho <b>IX<sub>i</sub></b>	Evento controlável
$r_x$	Clamp (Release) Ativado pelo acionamento do dispositivo presente nas estações de trabalho <b>IX<sub>i</sub></b>	Evento não controlável
$rq_x$	Requisitar recurso (Estações de trabalho)	Evento controlável
$rp_x$	Reporte de recurso (Ação finalizada pela estação de trabalho)	Evento não controlável

Tabela 5.1: Nomenclatura de eventos

São apresentados os modelos e supervisores sintetizados e minimizados para cada tipo de subsistema, realizando a modelagem de um subsistema como exemplo para cada tipo presente na planta. Os modelos devem ser replicados para obter a modelagem do sistema inteiro.

Os modelos para subsistema tipo I (elementos limitadores de segmento **ST<sub>i</sub> - IX<sub>i</sub>**) são apresentados na Figura 5.7.

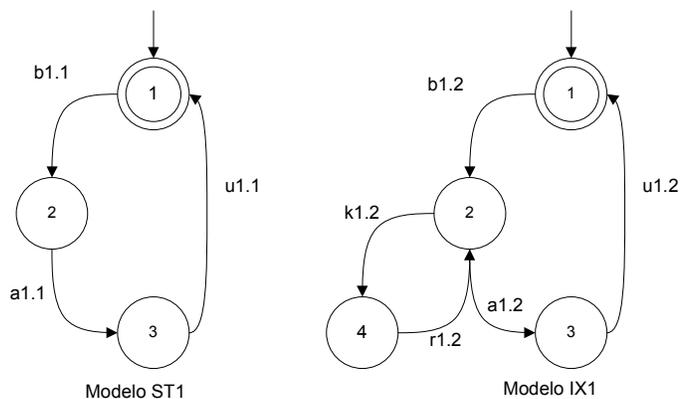


Figura 5.7. Modelos dispositivos  $ST_1$  -  $IX_1$ .

Utiliza-se a tabela 5.1 para a interpretação dos modelos. No modelo do dispositivo  $ST_1$ , o estado inicial representa que o dispositivo se encontra vazio. O evento  $b_{1,1}$  indica a chegada de um pallet ao dispositivo; unicamente após a ocorrência deste evento não controlável, pode ocorrer o evento  $a_{1,1}$ , evento controlável que indica o acionamento do pino pneumático e a liberação do pallet. O evento  $u_{1,1}$  indica a confirmação que o evento de liberação realmente foi executado e, à volta ao estado inicial do modelo. O dispositivo  $IX_1$  (clamper) fisicamente é o acoplamento de um stopper com um atuador pneumático de prensagem. Utiliza-se o mesmo modelo para representar seu comportamento com a adição de dois eventos controláveis de abertura e fechamento (clamping e releasing). Como indicado no modelo, à execução do evento de fechamento  $k_{1,2}$  unicamente pode ser realizado após a chegada de um pallet no dispositivo e, o evento de abertura  $r_{1,2}$  pode ser executado exclusivamente após a execução do evento  $k_{1,2}$ .

Para o sistema inteiro é utilizada uma especificação de segurança válida para todos os segmentos. Especifica-se que unicamente pode existir um pallet simultaneamente em cada segmento. A especificação para o segmento  $ST_1$ - $IX_1$  é apresentada na figura 5.8.

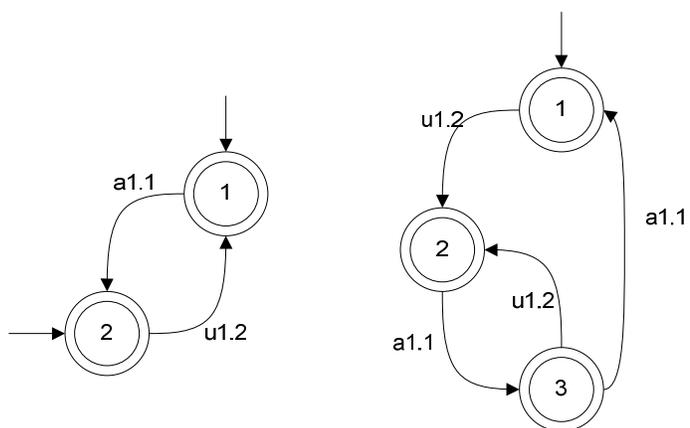


Figura 5.8. Especificação de segurança (Não determinística – Determinística).

A especificação verifica a existência de um único pallet por segmento permitindo a execução da liberação de um pallet estacionado no primeiro dispositivo do subsistema unicamente quando é executado o evento de confirmação da liberação do pallet do segundo dispositivo.

Seguindo a abordagem modular local apresentada previamente obtém-se o supervisor modular local para o subsistema do tipo I. O supervisor resultante e minimizado é apresentado na figura 5.9.

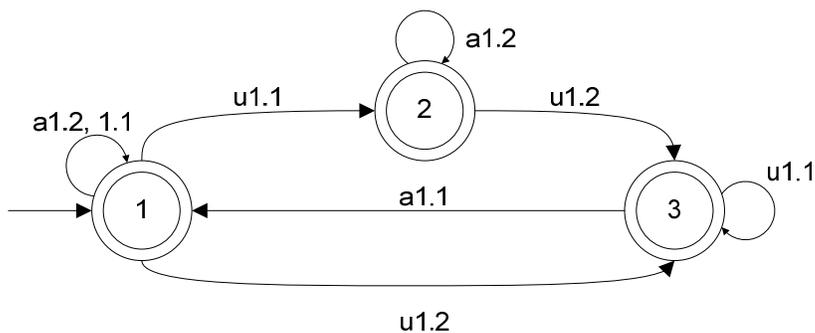


Figura 5.9. Supervisor Modular Local Reduzido – Subsistema Tipo I.

Os modelos para um subsistema Tipo II (Estação de trabalho,  $IX_1 - M_1$ ) são apresentados na figura 5.10.

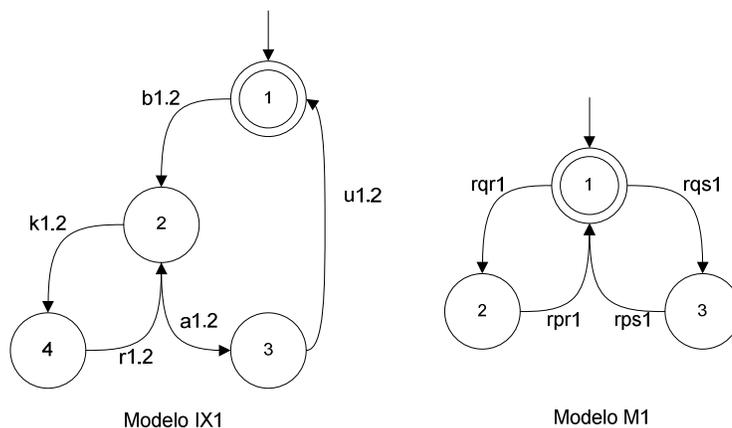


Figura 5.10. Modelos dispositivos  $IX_1 - M_1$ .

No modelo do dispositivo  $M_1$  é representado o comportamento da célula AS/RS. Os eventos controláveis  $rqr_1$  e  $rqs_1$  representam neste caso em particular as duas operações possíveis da máquina: Armazenagem (*storage*) e Retirada (*retrieval*) de materiais. O modelo deve ser replicado para este tipo de subsistema representando sempre o numero de operações que a máquina ou célula podem executar.

A especificação para este tipo de subsistema consiste em garantir que a execução das operações da máquina/célula ( $rqr_1$  e  $rqs_1$ ) sejam realizadas unicamente após o *pallet* contendo o produto estar apropriadamente seguro pelo *clammer*. A seqüência de eventos desejada é representada no modelo da especificação. O modelo é apresentado na figura 5.11.

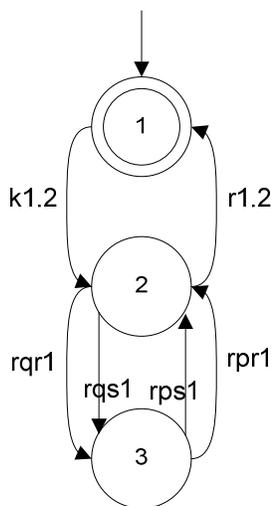


Figura 5.11. Especificação de segurança ( $IX_1 - M_1$ ).

Seguindo a abordagem modular local obtém-se o supervisor modular local para o subsistema do tipo II. O supervisor resultante e minimizado é apresentado na figura 5.12.

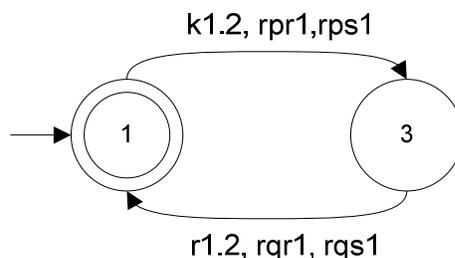


Figura 5.11. Supervisor Modular Local Reduzido – Subsistema Tipo II.

Os modelos para um subsistema Tipo III (Shunt -  $SH_1$   $ST_2$   $ST_4$ ) são apresentados na figura 5.13.

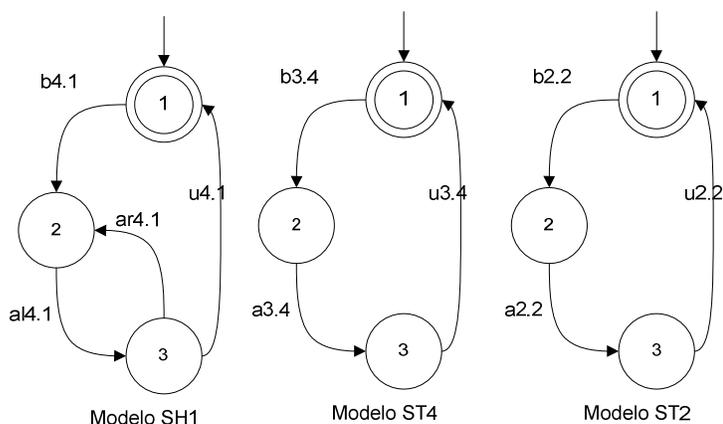


Figura 5.13. Modelos dispositivos  $ST_2$  -  $SH_1$  -  $ST_4$ .

Nota-se que o modelo do dispositivo  $SH_1$  é representado por um modelo praticamente equivalente a um dispositivo *stopper*, existe unicamente a diferença dos eventos  $al_x$  e  $ar_x$ . Estes eventos controláveis representam a mudança de direção de um *pallet* pelo acionamento do atuador pneumático encarregado da liberação e, neste caso, da mudança de direção.

A especificação de segurança neste tipo de subsistema estabelece que unicamente possa existir um *pallet* por segmento do sistema de transporte. Neste caso, a especificação deve contemplar o controle de dois segmentos simultaneamente. A especificação é apresentada na figura 5.14.

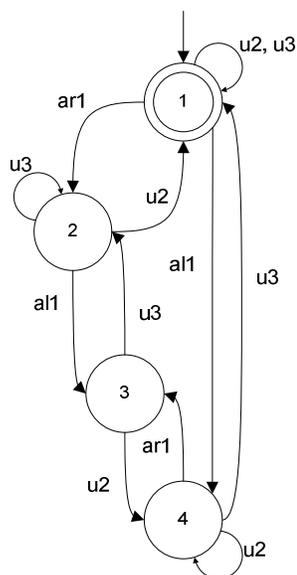


Figura 5.14. Especificação de segurança ( $ST_2 - SH_1 - ST_4$ ).

Seguindo a abordagem modular local obtém-se o supervisor modular local para o subsistema do tipo III. O supervisor resultante e minimizado é apresentado na figura 5.15.

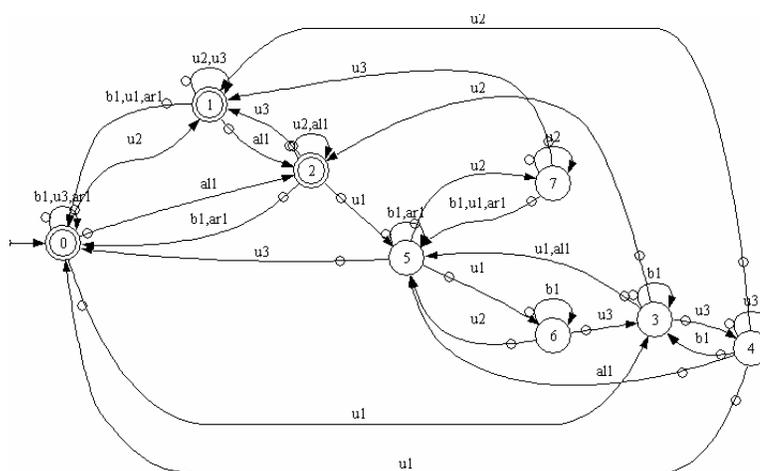


Figura 5.15. Supervisor Modular Local Reduzido – Subsistema Tipo III.

Os modelos para um subsistema Tipo IV (Junção,  $ST_4 - ST_2 - ST_7$ ) são apresentados na figura 5.16.

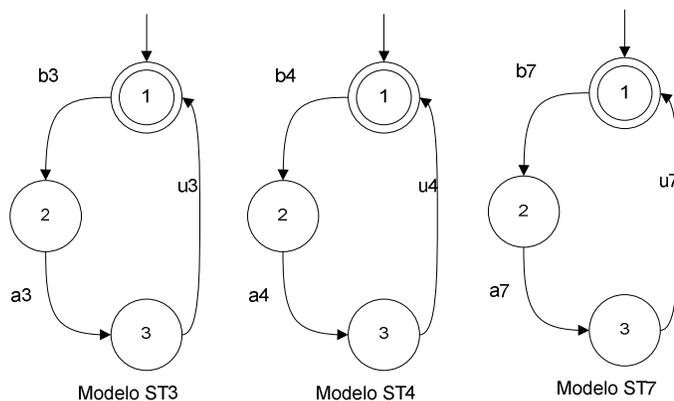


Figura 5.16. Modelos dispositivos  $ST_4 - ST_3 - ST_7$ .

A especificação de segurança para este tipo de subsistema estabelece que não deva ocorrer colisão entre pallets trafegando por ele. Após uma liberação executada por  $ST_3$  ou  $ST_4$  ( $a_3$  ou  $a_4$ ), é necessária a execução do evento  $u_7$ , o qual garante que o segmento compartilhado se encontra disponível para o próximo disparo. A especificação é apresentada na figura 5.17.

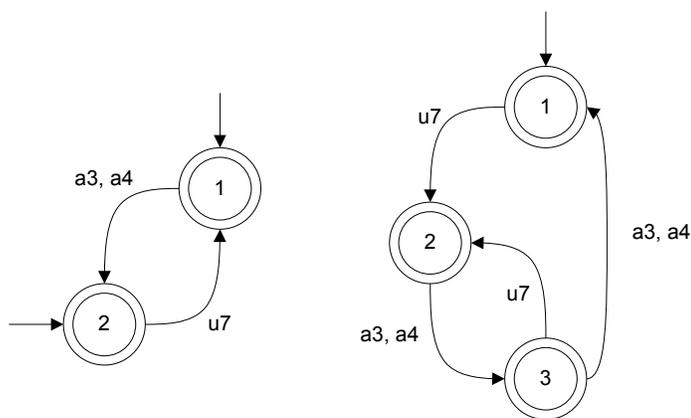


Figura 5.17. Especificação de segurança  $ST_4 - ST_3 - ST_7$  (Não Determinística – Determinística).

Seguindo a abordagem modular local obtém-se o supervisor modular local para o subsistema do tipo IV. O supervisor resultante e minimizado é apresentado na figura 5.18.

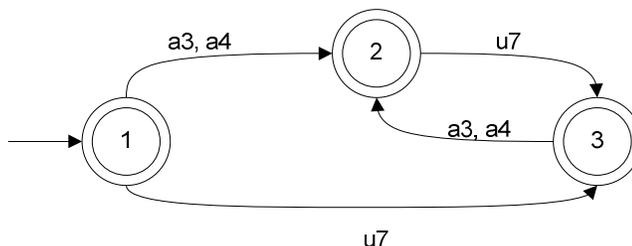


Figura 5.18. Supervisor Modular Local Reduzido – Subsistema Tipo IV.

Uma vez que todos os subsistemas sejam modelados, analisados e seus supervisores sintetizados, procede-se com a modelagem do nível de coordenação de roteamento utilizando Redes de Petri Coloridas.

### 5.3.2 Modelagem do Nível de Coordenação de Roteamento

Para a modelagem do Nível de Coordenação e Roteamento é utilizada a ferramenta CPN Tools, desenvolvida pelo grupo de pesquisa “CPN Group” da Universidade de Aarhus, Dinamarca. A ferramenta permite a edição, simulação e análise de Redes de Petri Coloridas.

A primeira etapa da modelagem estabelece a definição das variáveis de ambiente necessárias para a implementação da rede. As definições para o sistema de manufatura utilizado é apresentado:

- **colset ROUTE = list STRING;** Color set definido para a representação da seqüência de produção de cada produto. O formato predefinido da lista obedece à nomenclatura das estações de trabalho. Por exemplo, se é definido um produto P1, a seqüência de produção define-se como uma lista de STRINGS contendo esta informação {"M<sub>1</sub>", "M<sub>2</sub>", "M<sub>3</sub>"}

- **colset zero = int 0..i;** Color set do tipo inteiro definido para representar o índice da seqüência de produção. Após a execução de uma operação este índice é automaticamente incrementado para que as próximas verificações sejam realizadas com a próxima operação.

- **colset PIECES = product ROUTE x zero;** Color set que define um produto. É a combinação de um color set do tipo ROUTE e zero, representa o tipo das fichas que trafegam na rede.

A interface de comunicação é implementada utilizando a ferramenta de comunicação Comms/CPN (Gallash e Kristensen, 2001). É uma biblioteca CPN ML que proporciona um método para a comunicação de um modelo implementado utilizando a ferramenta CPN Tools e processos externos. O protocolo base utilizado para a implantação desta ferramenta é o

protocolo TCP/IP, o qual é amplamente utilizado e oferece a característica que a maioria dos sistemas operacionais, dispositivos de controle industrial e pacotes de software (incluindo o SML – linguagem base do CPN Tools) possuem uma camada TCP/IP implementada. A figura 5.19 apresenta a divisão de camadas e a interface entre o modelo e o protocolo TCP/IP.

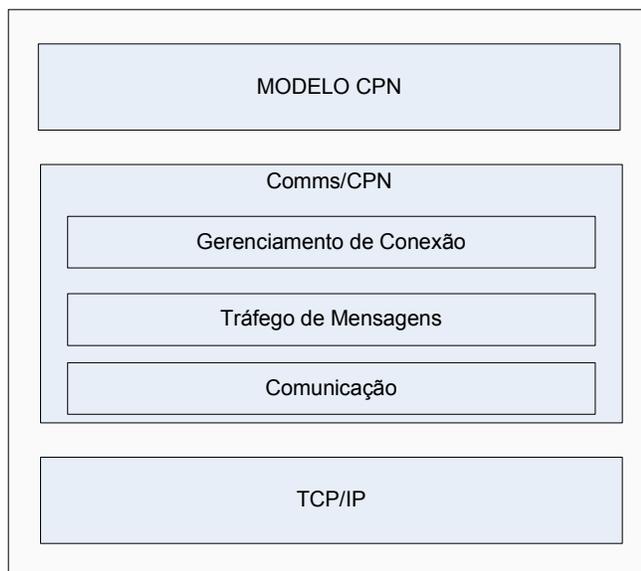


Figura 5.19. Camadas interface de comunicação.

A camada de comunicação trata dos métodos básicos de comunicação e implementa a interface com o TCP/IP, a camada de tráfego de mensagens trata com a transferência de dados e proporciona uma abstração para o intercâmbio de mensagens entre o CPN e aplicações externas e, a camada de gerenciamento de conexão trata da correta aplicação e gerenciamento das conexões realizadas. Apresentam-se as funções da interface TCP/IP para a implementação da interface de comunicação entre o nível de coordenação de roteamento e o nível supervisão.

```
- openConnection ("TCS", 127.0.0.1,9000);
- closeConnection("TCS");
```

As funções de abertura e fechamento de uma conexão recebem como parâmetro um nome (string) para a conexão, neste caso "TCS", o endereço IP (127.0.0.1 – *localhost*, no caso da conexão estar sendo realizada para um pacote de software na máquina onde o CPN é executado) e a porta na qual deve ser estabelecida a conexão.

```
- fun sendTCS (status) = ConnManagementLayer.send ("TCS", !status, stringEncode);
- fun receiveTCS ( ) = ConnManagementLayer.receive ("TCS", stringDecode);
```

As funções de envio e recebimento de informação recebem como parâmetros o nome da conexão, a qual deve ser previamente aberta, a variável contendo os dados a enviar (no caso da função `sendTCS`) e o tipo de codificação dos dados, o qual define o tipo de interpretação dos dados a enviar-receber, os possíveis tipos de dados são `string` e `integer`. Uma desvantagem apresentada pela função `receive` é que ela é bloqueante. O modelo do coordenador fica bloqueado se um pacote de dados não é recebido após a chamada da função. Esta limitação está sendo trabalhada pelos autores (Gallasch e Kirstensen, 2001).

- Para a atualização de variáveis no coordenador de roteamento são utilizados `reference variables`, as quais atuam como ponteiros. São estabelecidas uma ordem e um tamanho fixos para o acesso à informação. Esta informação é sempre recebida em forma de strings, onde cada número de bytes especificados corresponde ao estado de um evento. O formato do pacote trafegado é apresentado na figura 5.20. O primeiro byte indica o tamanho da informação a trafegar (*payload*).

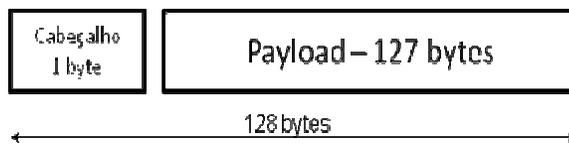


Figura 5.20. Formato do pacote de comunicação Comms/CPN

- Da mesma maneira como é estabelecido um canal de comunicação entre o nível de coordenação e supervisão, é estabelecida uma interface de comunicação entre a camada de planejamento e controle da produção e o nível de coordenação. Desta maneira efetua-se uma integração total da arquitetura de controle proposta. O nível de coordenação recebe dados da ordem de produção a executar proveniente do nível de PCP, indica que ordem, que produtos, que quantidade, e que seqüência na planta cada um deles deve seguir. Para o exemplo apresentado neste trabalho, é utilizado um tipo de comunicação por arquivo, no qual, através de um formato previamente estabelecido, o nível de PCP informa a ordem de produção. Esta ordem é posteriormente lida e processada pelo nível de coordenação, criando neste processo as fichas necessárias para o acompanhamento e controle do processo. O formato do arquivo, e funções utilizadas no processo são apresentadas.

O arquivo gerado pelo PCP deve seguir o seguinte formato:

- Cada linha do arquivo representa a seqüência de produção de um determinado produto, descrito explicitamente pela seqüência de máquinas/estações que o produto deve

seguir, separados por um caractere definido e.g “;”. A figura 5.21 apresenta o formato de um arquivo exemplo para quatro produtos, onde Mx indica o nome da maquina/estação.

*Input.txt*

```
M1;M3;M4;M5
M2;M3;M2
M1;M2;M3
M5;M3;M1
```

Figura 5.21. Formato do arquivo de comunicação PCP-Coordenação de Roteamento.

```
- fun loadData (filename) = let
    val infile = TextIO.openIn(Output.getModDir()^^filename) in
    TextIO.input infile before
    TextIO.closeIn(file) end
```

A função cria uma única ficha do tipo *STRING* contendo a seqüência de caracteres presentes no arquivo.

```
- fun makeRecords data = String.tokens (fn c => [#"\n"] == [c]) data
```

A função cria a partir da ficha retornada pela função *loadData* um conjunto de fichas do tipo *STRING* equivalentes ao número de produtos (linhas) na ordem, identificando o caracter “\n” que indica uma nova linha.

```
- fun makeValues records = List.map (fn str => String.fields (fn c => [#:] == [c])str) records
```

A função cria a partir das fichas retornadas pela função *makeRecords*, efetivamente fichas contendo o roteiro de produção desejado. Retorna fichas do tipo *STRING LIST*.

Para obter as fichas que são processadas na rede, basta com executar uma linha de código com chamadas sucessivas das funções apresentadas. *makeValues(makeRecords(loadData("Input.txt")))*.

Uma vez as variáveis e funções de ambiente estabelecidas, procede-se a utilizar a estrutura básica de controle apresentada no capítulo quatro para a construção do modelo. No caso do sistema flexível de manufatura modelado, a estrutura de controle básica é facilmente adaptável. O layout físico da planta facilita a construção do modelo, já que a estrutura básica modelada apresenta as interfaces para a comunicação, decisão e atualização necessárias na planta exemplo.

A primeira parte do modelo implementado em CPN estabelece a interface de comunicação utilizando a biblioteca Comms/CPN com o nível Supervisão. A comunicação TCP/IP é estabelecida e procede-se a estabelecer a comunicação com o nível PCP. É realizada a leitura do arquivo proveniente do PCP e a criação e inicialização das fichas que trafegam na

rede. A Figura 5.22 apresenta a implementação da interface de comunicação, a inicialização das fichas na rede e as variáveis utilizadas para o tráfego de informação interna e externa à rede.

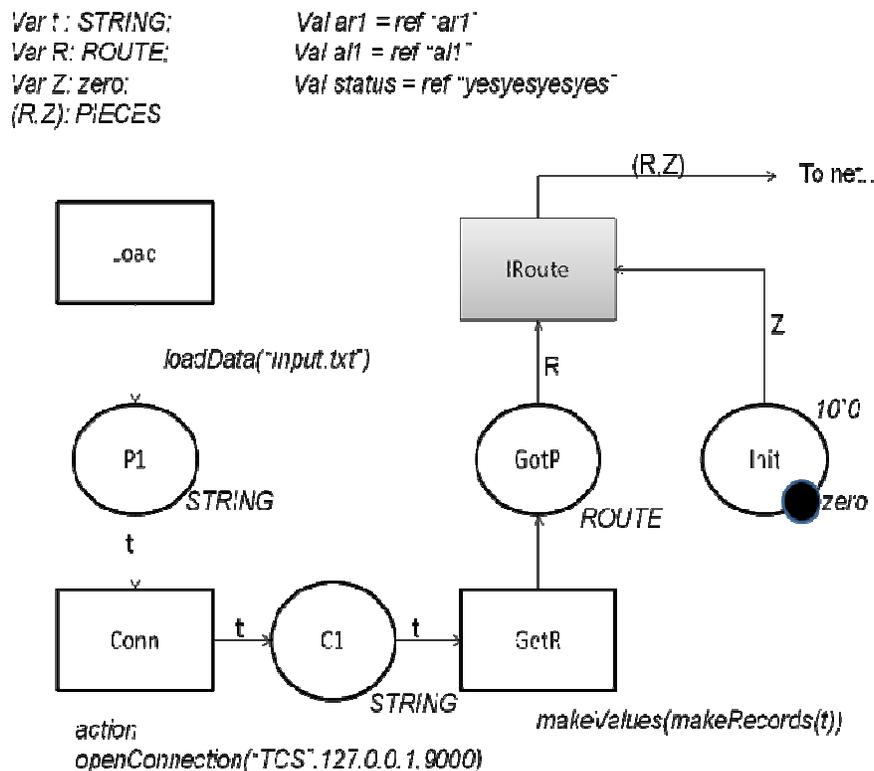


Figura 5.22. Inicialização Coordenação de Roteamento

Uma vez que as fichas são inicializadas pela rede (após o disparo da transição *IRoute*), são posicionadas no ponto inicial do processo de produção, no caso da planta exemplo, este ponto localiza-se no AS/RS, a estação de armazenamento automático. O estado inicial da rede exige que não exista nenhum produto circulando na rede, e que o número de pallets seja menor que o número de segmentos ativados da planta. Todas as fichas entrantes na rede são inicializadas com índice zero, o qual indica que a seqüência de processamento deve ser lida pela rede desde o ponto inicial.

O modelo parcial da planta apresentando os *guards* de verificação de roteamento e ações de controle e comunicação são apresentados na figura 5.23 e 5.24.

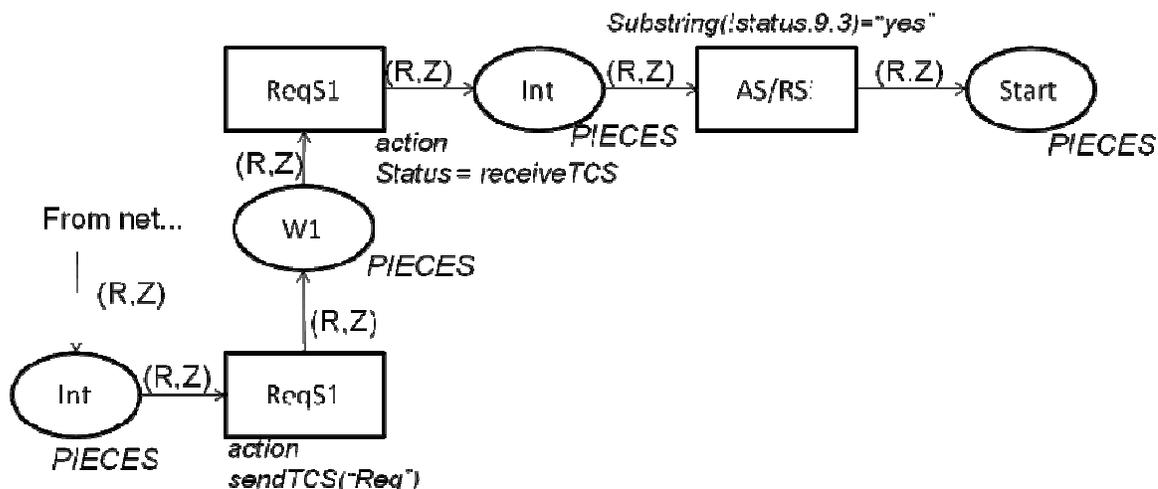


Figura 5.23 Modelo em RPC da coordenação de roteamento, estágio inicial.

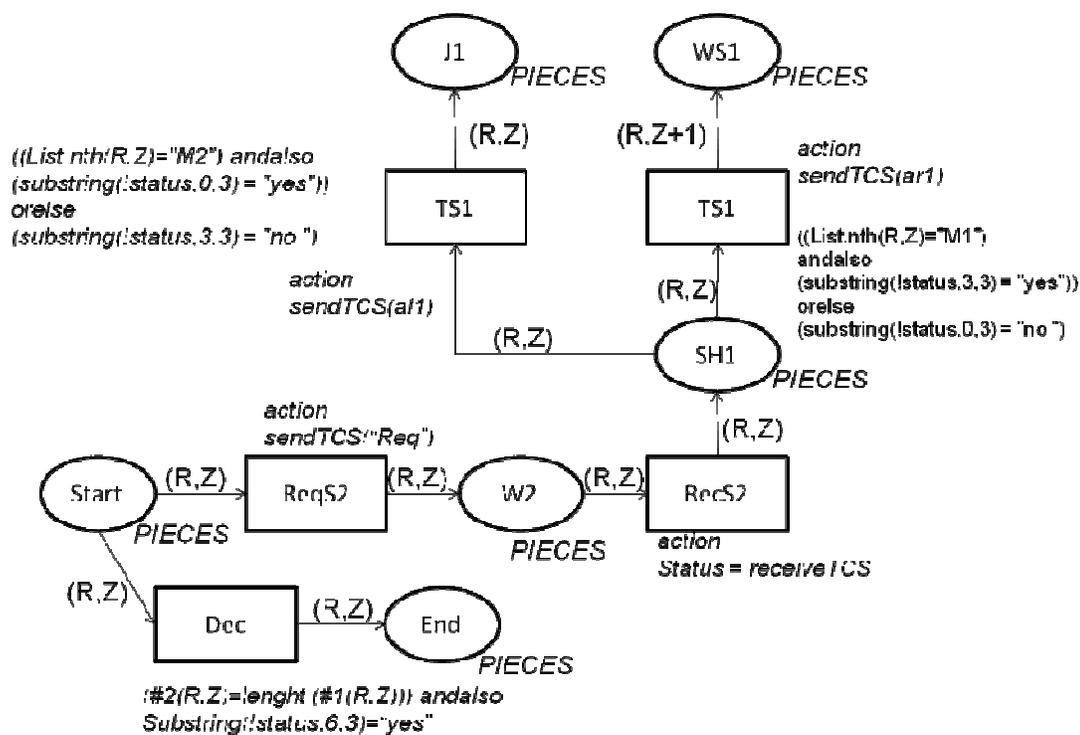


Figura 5.24. Modelo em RPC da coordenação de roteamento. Modelagem decisão de roteamento SH1.

Nas figuras 5.23 e 5.24 é apresentada a implementação da estrutura básica de controle e comunicação para o caso de entrada no sistema (AS/RSi) e a decisão de roteamento

executada no dispositivo **SH<sub>1</sub>**. Para a verificação de rota e toma de decisões são utilizados recursos próprios da linguagem da ferramenta utilizada (CPN tools), não sendo esta, a única maneira de realizá-las. Os lugares Int (figura 5.22) e SH1 (figura 5.23) identificam-se como os lugares prévios à decisão de roteamento ou processamento. Após estes lugares, existem transições com *guards*, os quais avaliarão em verdadeiro ou falso, decidindo assim, qual ou quais eventos devem ser desabilitados no nível supervisão. Para a construção dos *guards* é utilizada a função *List.nth(R,Z)* a qual permite a extração de um elemento de uma lista. A função recebe como parâmetros a lista de elementos, a qual contém o roteiro de produção e o elemento a extrair, o qual representa o índice no roteiro de produção para o produto em questão. Uma vez obtido o estado do processamento atual do produto é comparado com o nome da estação para qual o produto deverá prosseguir.

No exemplo das figuras anteriores estações M1 (produto prossegue para o lugar WS1) e M2 (produto prossegue para o lugar J1). Após a verificação do roteiro de produção, são utilizadas as informações previamente obtidas pela estrutura base de comunicação na mesma lógica e são verificados o valor (ativo/inativo) dos eventos fornecidos pelo nível supervisão. No exemplo, é recebido sempre o estado de todos os eventos controláveis envolvidos nas decisões da planta num mesmo pacote de dados. A informação de cada estado da planta é extraída de um único *STRING* (*var : status*) utilizando a função *substring*, para cada evento são reservados três caracteres indicando se o evento encontra-se habilitado “yes” ou desabilitado “no”. Finalmente, com a informação do produto e do estado da planta, a lógica de um único *guard* das transições resultará em um valor booleano verdadeiro, e a transição será habilitada. No evento de disparo da transição ocorre à atualização do nível supervisão, o nível de coordenação informa que evento deverá acontecer, enviando a desabilitação dos eventos necessários para que isso ocorra. Se a rota leva o produto a uma estação de processamento (*Workstation*), no caso do arco TS1-WS1, por exemplo, acontece também o incremento do índice do roteiro de produção, isto garante que a próxima comparação realizada nos *guards*, seja realizada com o roteiro do produto atualizado.

Um exemplo de atualização de eventos é apresentado na figura 5.25, onde os eventos controláveis terão, nas suas respectivas codificações, desabilitações implementadas do nível Supervisório (dis a1, dis a2) e adicionalmente, as desabilitações enviadas pelo coordenador de roteamento (dis a1r, dis a2r). O diagrama ladder corresponde a uma seqüência de eventos controláveis seguindo o modelo de implementação Queiroz e Cury (2001).

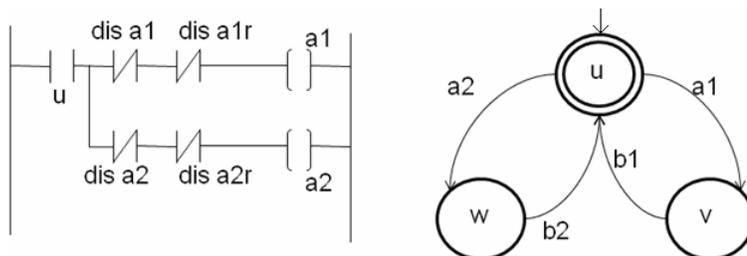


Figura 5.25. Diagrama de Codificação

A validação da proposta foi realizada utilizando simulação, foi implementada a Rede de Petri Colorida para uma parte da planta exemplo, com todas as verificações e declarações possíveis. Foi criado um arquivo exemplo contendo uma ordem de produção previamente estabelecida e no formato desejado para servir como entrada proveniente do nível PCP. Esta ordem de produção é corretamente interpretada e convertida em fichas pela rede.

Utilizando comunicação TCP/IP é realizada a comunicação com o software Elipse E3 e com um programa de monitoramento de comunicação o qual suporta interfaces Serial RS-232, RS-485 e TCP/IP *client/Server*. O programa é capaz de gerar pacotes pré-configurados automaticamente em resposta a determinados pacotes recebidos, possibilitando assim a simulação de uma seqüência de eventos possíveis num supervisor. Em resposta ao pedido de atualização, o programa gera automaticamente a resposta contendo o pacote com os estados desejados, atuando como nível supervisão.

Utilizando a arquitetura proposta tem-se uma estrutura híbrida de controle utilizando as propriedades de duas abordagens para a concepção de sistemas de controle, cada uma tratando de diferentes necessidades do sistema, estando em constante comunicação e colaboração para obter um sistema de controle mais abrangente e completo, propício para a modelagem de complexos sistemas flexíveis de manufatura.

## Capítulo 6

### Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho é apresentada uma abordagem híbrida para o projeto de um sistema de controle aplicado a sistemas flexíveis de manufatura. A metodologia utiliza duas poderosas ferramentas de modelagem de síntese de controladores para SEDs, a TCS e RPC. A arquitetura de controle proposta pode ser modificada, expandida e replicada para incrementar a flexibilidade de um sistema de manufatura, já que a re-implementações e modificações do sistema de controle podem ser facilmente aplicados.

A utilização da TCS e da abordagem modular local mostraram-se adequadas para a modelagem e para a síntese dos supervisores, considerando a construção de regras de controle para o tratamento de segurança e seqüenciamento de eventos. A abordagem proposta por Queiroz e Cury (2002) também se mostrou adequada para a proposta do presente trabalho, uma vez que facilitou a inserção de um novo nível de controle de forma relativamente simples.

Uma continuação natural do trabalho seria a implementação num Controlador Lógico Programável dos supervisores sintetizados, em comunicação com o modelo atualmente implementado utilizando CPN Tools, possibilitando assim um estudo mais profundo da abordagem e melhorias ao mesmo.

O tratamento do sincronismo, referente ao tempo de atualização de informações entre os dois níveis no modelo, também proporciona um campo de estudo no qual melhorias significativas podem ser obtidas.

Realizar análises de desempenho e de possíveis bloqueios e irregularidades nos supervisores como causa da inserção de uma interface de controle externa é um importante passo para a melhoria do modelo.

## Referências Bibliográficas

- BARBOSA. S.R, “*Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Projeto de Sistemas Automáticos com modelagem e controle da comunicação com o ambiente externo*”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- BELABBAS. A, BERRUET. P. “*FMS Reconfiguration based on Petri nets models*,” IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, The Hague, Netherlands, 10-13. 2004
- BEHABIB, B. WILLIAMS R.A, SMITH K.C, “*A DES-Theory-Based Hybrid Supervisory Control System for Manufacturing Systems*”, University of Toronto, Ontario, Canada, Journal of Manufacturing Systems,15.2, 1996.
- CARDEC. M, PRUNETE. F. “*Modelling of hybrid flexible production systems by Coloured Batches Petri Nets*”, Journal européen des systèmes automatisés (J. eur. syst. autom.), Lavoisier, Cachan, France. 1996.
- CARDOSO. J, VALETTE. R. “*Redes de Petri*” Serie Didática Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis, 1997.
- CASSANDRAS C. G. & LAFORTUNE S. “*Introduction to discrete event systems*”, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- DAENE. B, MOELDERS. A, MELBER. A. “*Modeling an industrial transportation facility with coloured Petri nets*”, XVIII International Conference on Applications and Theory of Petri Nets, Toulouse.1997.
- DE NEGRI V.J “*Introdução aos Sistemas para Automação e controle Industrial*”. Apostila do curso PosMec –UFSC, 52p.2004.

- DOTOLOI. M, FANTI. M.P. “*A colored Petri net model for automated storage and retrieval system serviced by rail-guided vehicles: a control perspective*”. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, v. 18, pp. 122-136. 2005.
- FABIAN. M, HELLGREN. A. “*PLC Based implementation of Supervisory Control for Discrete Event Systems*”. Proceedings of the 37<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control. v.3, pp 3305-3310. v3. 1998
- GALLASH. G, KIRSTENSEN. L.M. “*Comms/CPN: A Communication Infrastructure for External Communication with Design/CPN*”, 3<sup>rd</sup> Workshop and Tutorial on Practical Use of Colored Petri Nets and the CPN Tools, pages-75-90. DAIMI PB-554, Aarhus University, August 2001.
- GOUYON. D, PETIN. J. Morel, G. “*Control Synthesis for product Driven Automation*” Nancy Reasearch Centre for Automatic Control, Henry Poincare University, IFAC 2004, 7<sup>th</sup> WorkShop on Discrete Event Systems, Reims, 22-24/09/2004.
- IEC 848. “*International Eletrotechnical Comission. Preparation of function charts for control systems*”, Switzerland, 1988.
- IP. W.H, RICHARD. C.M. “*Logistics Information Management*”- Volume 11 Number 3 pp 160-170, MCB University Press. 1998.
- JENSEN. K. “*Coloured Petri Nets : Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*”. 1st EARCS Monographs on Theoretical Computer Science, Springer. 1992.
- KUMAR. K.D, KARUNAMOORTHY. L, ROTH. H, MIRNALINEE. T.T. “*AN Infrastructure for Integrated Automation System Implementation*”. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 16,183-199, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.2004.

- LAUZON S.C, MA A.K.L, MILLS. J.K, BENHABIB. B, “*Application of Discrete-Event-System Theory to Flexible Manufacturing*”. IEEE CONTROL SYSTEMS 1999.
- MURATA. T. “*Petri Nets: Properties, analysis and applications*”. Proceedings of IEEE, local, v.77, n.4, p 541-580. 1989
- PETRI. C.A “Communication with automata” Tech report n, RADC-TR-65-377. Versão Inglesa.1996.
- PETRONI. A, BEVILACQUA. M, International Journal of operations & Production Management, 2002,22,7/8, pg 929
- QUEIROZ. M.H. de. “*Controle Supervisório Modular de Sistemas de Grande Porte*”. Florianópolis. Mestrado (Dissertação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico,Universidade Federal de Santa Catarina. 2000.
- QUEIROZ. M.H. de. CURY. J.E.R. “*Modular supervisory control of large scale discreteevent systems*”. Proceedings of the 5th International Workshop on Discrete Event Systems: Analysis and Control. Ghent, Belgium: Kluwer Academic Publishers, p. 103-110. 2000.
- QUEIROZ. M.H. de, SANTOS. E.A.P, CURY. J.E.R; “*Sintese Modular do Controle Supervisorio em Diagramas Escada para uma Celula de Manufatura*”. Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Canela, 2001.
- QUEIROZ. M.H. de, CURY. J.E.R. “*Modular control of composed systems*”. Proceedings of the American Control Conference. Chicago, USA. 2000.
- QUEIROZ. M.H. de, CURY. J.E.R. “*Controle supervisório modular de sistemas de manufatura*”. *Revista controle & automação*, v. 13, n. 2, p. 115-125. 2002.
- RAMADGE. P. J, WONHAM. W. M. “*The control of discrete event systems,*” Proceedings IEEE, Special Issue on Discrete Event Dynamic Systems, vol. 77, pp. 1202-1218. 1989.

- SACKMANN. D, EY. H, MUTZ. M, SAUER. J. "*Adaptive Job-Shop Scheduling with Routing and Sequencing Flexibility using Expert Knowledge and Coloured Petri nets*", IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Nashville, TN, USA, October 8-11, S. 3212-3217. 2000
- SANTOS E. A. "*Contribuições ao Projeto Conceitual de Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizados*" Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- SHEHAB. E.M, SHARP. M.W, SUPRAMANIAM. L, SPEDDING. T.A, "*Enterprise Resource Planning, An integrative review*", Business Process Management Journal, Vol 10, No 4, pp 359-386. 2004.
- UZAM. M, WONHAM. W.M. "*A hybrid approach to supervisory control of discrete event systems coupling RW supervisors to Petri nets*". International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, v. 28, pp. 747-760. 2006.
- VIEIRA. A. D, CURY. J. E. R, QUEIROZ. M. H. de. "*A model for PLC implementation of supervisory control of discrete event systems*". 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and factory Automation, p.225-232. 2006.
- WIGHT. O.W "*The executive's guide to Successful MRPII*", The Book Press, Brattleboro, VT ,1984
- WONHAM. W.M "*Notes on Control of Discrete Event Systems*" Canada, department of Electrical and Computer Engineering", 2003.
- WU. N, ZHOU. M. "*Resource-oriented Petri nets for deadlock avoidance in automated manufacturing*". International Conference on Robotics and Automation 2000. Volume: 4, page(s): 3377-3382. 2000.

ZIMMERMANN. A. "*A modeling method for flexible manufacturing systems based on colored Petri nets*", International WorkShop on new Directions of Control and Manufacturing, Hong Kong, pp 147-154, 1994.