

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

JAIRO R. CANTILLO, MARCO A. Busetti, EDUARDO F. R. LOURES, EDUARDO A. P. SANTOS

*Laboratório de Automação e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba – PR 80215 901*

*E-mails:*

*[jairo.rafael@terra.com.br](mailto:jairo.rafael@terra.com.br), [marco.busetti@pucpr.br](mailto:marco.busetti@pucpr.br), [eduardo.loures@pucpr.br](mailto:eduardo.loures@pucpr.br),  
[eduardo.portela@pucpr.br](mailto:eduardo.portela@pucpr.br)*

**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 routing of the products in the manufacturing system, 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.

**Keywords**— Flexible Manufacturing Systems, Supervisory Control Theory, Colored Petri Nets, Automation.

**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 sequenciamento 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 diferentes rotas de produção podem ser realizadas.

**Palavras-chave**— Sistemas Flexíveis de Manufatura, Teoria de Controle Supervisório, Redes de Petri Coloridas, Automação.

## 1 Introdução

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 contrario, o projeto desta estrutura necessita de ferramentas formais tanto para síntese quanto para sua implementação.

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 sequencial 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 baseadas em 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 sequenciamentos. 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.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: na Seção 2 são apresentados os fundamentos da TCS, da abordagem modular local e das RPC; na Seção 3 é apresentada a arquitetura de controle proposta; na Seção 4, é apresentada a descrição do sistema de manufatura tratado; na Seção 5 é apresentada a modelagem do sistema físico, as especificações de controle e os supervisores modulares; na Seção 6 é apresentada a modelagem da coordenação de roteamento utilizando RPC; na Seção 7 são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Teoria de Controle Supervisorio

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  $S: L(G) \rightarrow 2^2$  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  $E_{loc,j}$ , obtida a partir da composição síncrona de uma especificação  $E_j$ , para  $j \in J = \{0, \dots, m\}$ , com a respectiva planta local  $G_{loc,i}$ ,

$l \in L = \{0, \dots, w\}$ . 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  $S_{loc,j}$ , é realizada considerando a máxima linguagem controlável contida em  $\text{sup}C(E_{loc,j}, G_{loc,i})$ .

### 2.2 Redes de Petri Coloridas

As redes de petri é uma teoria desenvolvida para a descrição e representação de Sistemas a Eventos Discretos. Uma rede de petri é uma 5-tupla  $(P, T, A+, A-, \sigma)$ , sendo  $P$  é um conjunto finito de lugares;  $T$  é um conjunto finito de transições;  $A+$  e  $A-$  são matrizes  $m$  por  $n$ , descrevendo a estrutura da rede; e  $\sigma$  é uma função de marcação que estabelece a cada transição uma marca pertencente ao alfabeto  $\Sigma$ .

As Redes de Petri de alto nível estão sendo extensamente usadas para diversos propósitos práticos. Elas provêm uma representação gráfica assim como uma semântica bem definida que permite uma análise formal (Jensen, 1992). A capacidade de representar e trabalhar com uma maior quantidade de informação que as redes clássicas fazem delas atrativas para a representação de sistemas de manufatura, onde grandes quantidades de informação trafegam pela rede.

Em (Jensen, 1992) é formalmente definida uma Rede de Petri Colorida generalizada como uma tupla:

$CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$ , onde  $\Sigma$  é um conjunto de estados finitos não vazios chamados conjunto de cores.  $P$  é um conjunto finito de lugares.  $T$  é um conjunto finito de transições.  $A$  é um conjunto finito de arcos.  $N$  é uma função nodo, definida desde  $A$  em  $P \times T \cup T \times P$ .  $C$  é uma função cor, definida desde  $P$  em  $\Sigma$ .  $G$  é uma função *guard*.  $E$  é uma função expressão de arco e  $I$  é uma função de inicialização.

O conjunto de cores determina os tipos, operações e funções que podem ser utilizadas nas inscrições da rede. Os lugares, transições e arcos são descritos pelos conjuntos  $P, T$  e  $A$ , os quais precisam ser finitos e disjuntos. A função nodo mapeia cada arco num par onde o primeiro elemento é o nodo fonte e o segundo o nodo destino. Nodos adjacentes têm que ser de tipos diferentes: um lugar e uma transição. A função  $C$  mapeia cada lugar,  $p$ , a um conjunto de cores  $C(p)$ ; cada ficha em  $p$  deve ter uma cor pertencente a  $C(p)$ . A função *guarda* mapeia cada transição,  $t$ , a uma expressão do tipo booleana. A função expressão arco  $E$  mapeia cada arco a uma expressão do tipo  $C(p(a))$ ; e a função inicialização mapeia cada lugar,  $p$ , a uma expressão do tipo  $C(p)$ .

Mas detalhes sobre o formalismo podem ser obtidos em (Jensen, 1992).

## 3 Estrutura híbrida de controle

A arquitetura de controle utilizada no presente trabalho é baseada no modelo proposto por Queiroz e Cury (2002), adicionando-se um nível de coordenação baseado no formalismo de RPC. A arquitetura é apresentada na figura 1. Os níveis do modelo proposto por Queiroz e Cury (2002), Supervisores Modulares, Sistemas Produto e Seqüências 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 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. E, considerando que os eventos controláveis estão geralmente relacionados a comandos enviados a planta, a decisão de rota passa em definir qual de dois ou mais eventos controláveis deve ocorrer de fato.

Nesse sentido, propõe-se resolver este problema através da inserção de um nível denominado Coordenador de Roteamento (ver figura 1). 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.

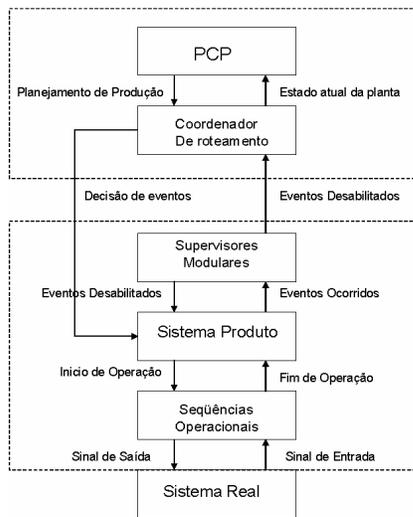


Figura 1: Estrutura híbrida de controle

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 constantemente atualizadas pelos supervisores e informações proveniente 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 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.

#### 4 Sistema integrado de manufatura

O sistema integrado de manufatura reproduz todos os aspectos de um processo de manufatura automatizada, provendo ao ambiente acadêmico, ferramentas para a avaliação e experimentação de sistemas a eventos discretos, engenharia de produção e de técnicas e teorias de engenharia de controle. Este sistema é composto de vários dispositivos e pacotes de software, que quando integrados fazem da plataforma um ambiente capaz de executar um processo de manufatura totalmente planejado, flexível e automatizado.

Fisicamente, a plataforma ocupa um espaço de 50 metros quadrados, e seus componentes principais são: Sistema de transporte por correias; AS/RS (Sistema de armazenamento automático); Célula de montagem; Estação flexível de soldagem; Estação de torneamento e estação de fresagem. A disposição física existente permite a expansão, a capacidade de roteamentos alternativos e isolamento de estações de trabalho. Na figura 2, a disposição física do sistema é apresentada. As cinco estações de trabalho são interconectadas através de um sistema de transporte por correias.

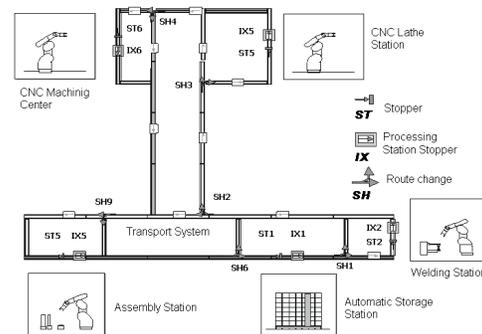


Figura 2. Layout do sistema integrado de manufatura.

##### 4.1 Detalhes do Sistema de Transporte

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 param 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. Cada segmento é definido por dois dispositivos sucessivos de parada. Cada dispositivo pode ser *stoppers* - ST, *shunts* - SH ou *clampers* - IX. Cada um dos dispositivos é descrito em detalhes a seguir.

O *stopper* (ST), ilustrado na Figura 3, é o dispositivo que detém o *pallet*. A chegada 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.

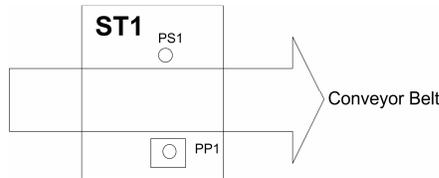


Figura 3. Stopper

Para cada estação de trabalho (Soldagem, AS/RS, montagem e usinagem), existe um dispositivo de prensagem (*Clamper* - IX), ilustrado na figura 4. Ele tem a função de fixar o *pallet* para manipulação correta e segura das estações de trabalho. O dispositivo possui as mesmas características de um *stopper* com a adição de um atuador de prensagem (PP1).

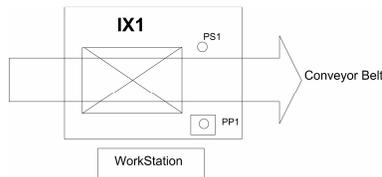


Figura 4. Clamper

O dispositivo *shunt* (SH), ilustrado na Figura 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 as especificações de segurança e roteamento para os caminhos disponíveis.

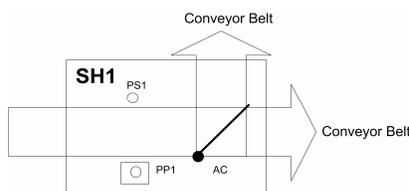


Figura 5. Shunt

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

## 5 Modelagem do Sistema Físico

Os modelos construídos e os supervisores sintetizados foram projetados e sintetizados 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 no processo de manufatura. O sistema foi modelado considerando as estações de trabalho e os segmentos do sistema de transporte.

O presente trabalho utilizou uma parte da planta, composta por duas estações de trabalho (ASRS e Soldagem) e os segmentos de transporte que as interliga. Uma vista parcial e mais detalhada do sistema considerado é apresentada na Figura 6.

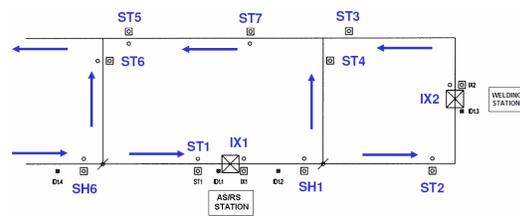


Figura 6. Vista parcial do sistema

Seguindo a abordagem modular local, inicialmente são identificados quatro subsistemas assíncronos: o primeiro é composto por dispositivos limitadores de segmento (ST<sub>i</sub>,  $i = 1, \dots, 7$ ); o segundo é composto por um dispositivo *stopper* e uma estação de trabalho (IX<sub>i</sub>,  $i = 1, 2$ ); o terceiro é composto por um *shunt* (SH<sub>i</sub>,  $i = 1, 6$ ) e dois *stoppers* (SH1 – ST2 e ST4, SH6 – ST6 e ST1) imediatamente anexos; o quarto subsistema é composto de três dispositivos *stoppers*, os quais juntos formam um cruzamento (ST3 – ST4 – ST7). Para apresentar a interação entre a coordenação de roteamento e os modelos utilizando TCS são apresentados unicamente os modelos onde efetivamente existe troca de informações.

O *shunt* (representado na Figura 6 por SH<sub>x</sub>, sendo  $x$  seu número), é o dispositivo que determina a trajetória de um *pallet*. Este subsistema é composto por três elementos: Um dispositivo *Shunt* e dois *stoppers*. Por exemplo, em SH1 é tomada a decisão se o *pallet* deve se dirigir a estação de soldagem, ou seguir outra rota sem passar por esta estação.

Considerou-se que, para a proposta deste trabalho, as estações de trabalho têm a capacidade de executar duas ações de processamento de material. No caso do ASRS, é possível a retirada e o armazenamento de matéria prima e produto final, respectivamente. No caso da estação de soldagem, dois tipos de solda são possíveis de serem realizados.

As especificações atendidas pelos supervisores garantem que não exista colisão entre *pallets* circulantes na planta, limitam um *pallet* por segmento e restringem a utilização de recursos ocupados. Em função da quantidade e do tamanho dos modelos, somente os supervisores responsáveis

pela coordenação dos subsistemas *shunt* e da estação de soldagem são apresentados na Figura 7.

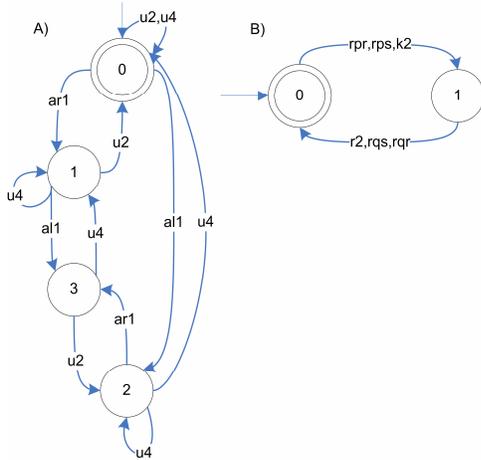


Figura 7. A) Supervisor para o shunt  
B) Supervisor para a estação de soldagem

A nomenclatura de eventos utilizada para a criação dos modelos e síntese de supervisores é descrita na tabela 1.

Tabela 1: Descrição de eventos

Nomenclatura de eventos	Descrição do Evento	Controlabilidade
alx/arx	<i>Pallet</i> é liberado ( $l = left, r = right$ )	Evento controlável
Ux	Confirmação de liberação de <i>pallet</i>	Evento não controlável
Kx	<i>Clamp</i> (Prensa)	Evento controlável
Rx	<i>Clamp Release</i>	Evento não controlável
Rqx	Requisitar recurso (Estações de trabalho)	Evento controlável
Rpx	Reporte de recurso (Ação finalizada pela estação de trabalho)	Evento não controlável

Os supervisores apresentados asseguram que colisões entre *pallets* não aconteçam dentro do subsistema shunt (Figura 7a). Também, garantem que não sejam executados pedidos de modificação de material (início de processamento de uma estação de trabalho) sem antes o *pallet* estar fixo através do *Clamp*, também garantindo que a liberação do *pallet* acontece somente após a finalização da atividade de uma estação de trabalho (Figura 7b).

## 6 Modelagem do Coordenador de Roteamento

Embora o sistema de manufatura seja capaz de processar diferentes tipos de produtos, a abordagem proposta considera somente dois tipos e um segmento da planta (conforme figura 6). A partir de modelos encontrados na literatura (Be-

labbus & Berruet 2004, Caradec & Prunet 1996, Daene et al 1997, Dotoli & Fanti 2005, Sackmann et al 2000, Uzam & Wonham 2006, Wu & Zhou 2000, Zimmerman 1994), o modelo de coordenação de roteamento é concebido. O modelo proposto inclui a interação entre o nível de Coordenador de Roteamento e os níveis Supervisores Modulares e Sistema Produto, conforme ilustrado na figura 1.

Na Figura 8 é apresentado o modelo para a coordenação de rotas a partir do Shunt1 (SH1) e a coordenação do tipo de processamento a ser realizado na estação de soldagem, com suas respectivas declarações. Para exemplificar os testes de modificação de rota, são apresentados os *guards* ou transições condicionais para o dispositivo shunt1 (representado pelo conjunto P2-T3-T1).

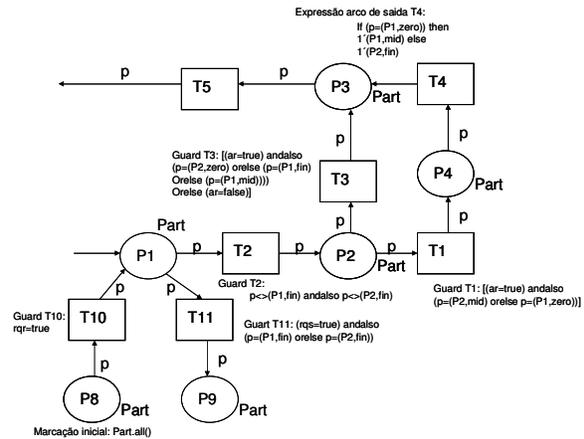


Figura 8. Modelo parcial do coordenador de roteamento.

Na figura 8, as variáveis booleanas *al*, *ar*, *rqr* e *rqs* representam os estados em comum entre os níveis de coordenação de roteamento e supervisão, os quais são constantemente atualizados para que todas as decisões e operações respeitem sempre o ultimo estado disponível da planta. Se estas variáveis têm valor lógico falso, o segmento ou operação determinada encontra-se desabilitado pelos supervisores e assim não poderá ser utilizado como uma trajetória possível ou recurso.

Dependendo do tipo da peça (*PartType*) e seu estado atual (*PartState*), são tomadas decisões de roteamento nas transições T1 e T3. Como exemplo são utilizados na planta dois tipos de produtos, P1 e P2, os quais podem estar em três estados possíveis: *Zero* (produto em estado inicial), *Med* (Produto em estado intermedio) e *Fin* (Produto finalizado).

Dependendo do tipo de produto e de seu estado, uma decisão deverá ser tomada nas transições de saída do lugar P2. Se o estado do produto for *Zero*, ele deverá continuar para o lugar P4 (estação de soldagem) para ser processado. Se o evento *ar* (*shunt right*) encontra-se naquele momento habilitado pelo supervisor, o teste do *guard* resultará verdadeiro e o produto continuará seu caminho para P4. No caso do produto estar no estado *Fin*, o produto não deve passar pela estação P2, e sua trajetória deve ser mudada para P3. Da mesma maneira, se o evento *al* (*shunt left*) não se encontra desabilitado pelo seu respectivo supervisor, o *guard*

correspondente resultará em verdadeiro e o evento al será executado.

Na necessidade de uma modificação de *layout*, a estrutura de controle pode ser facilmente replicada e implementada. Caso seja necessária a inserção de novos produtos na linha, cada *guard* de decisão deve verificar as características do novo produto para que a tomada de decisões seja correta.

## 7 Conclusões

Neste trabalho é apresentada uma abordagem híbrida para o projeto de um sistema de controle aplicado a sistemas flexíveis de manufatura. 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 arquitetura proposta por Queiroz e Cury (2000) também se mostrou adequada para a proposta do presente trabalho, uma vez que facilitou a inserção de um novo nível de forma relativamente simples.

## 8 Referencias

- Belabbas, A. Berruet, P. (2004) "FMS Reconfiguration based on Petri nets models," 2004 *IEEE international conference on systems, man & cybernetics*, The Hague, Netherlands, 10-13.
- Caradec, M. Prunte F.(1996). "Modelling of hybrid flexible production systems by Coloured Batches Petri Nets", *Journal européen des systèmes automatisés* (J. eur. syst. autom.), Lavoisier, Cachan, France.
- Daene, B. Moelders, A. Melber, A (1997). "Modeling an industrial transportation facility with coloured Petri nets", *XVIII International Conference on Applications and Theory of Petri Nets*, Toulouse.
- Dotoli, M. Fantì, M.P. (2005). "A coloured Petri net model for automated storage and retrieval systems serviced by rail-guided vehicles: a control perspective". *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, v. 18, pp. 122-136
- D. Gouyon, J. F. Petin and G. Morel. (2004). "Control synthesis for product-driven automation", *Proceedings of the Workshop on Discrete Event Systems*.
- Fabian, M.; Hellgren, A. (1998). "PLC-based implementation of supervisory control for discrete event systems" *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*.
- Jensen.K, (1992). "Coloured Petri Nets : Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use". 1 *EARCS Monographs on Theoretical Computer Science*, Springer.
- Queiroz, M.H. Cury, J.E.R. (2000). "Modular Supervisory Control of Large Scale Discrete-Event Systems", *Discrete Event Systems: Analysis and Control*. Kluwer Academic Publishers. (Proc. WODES 2000).
- Queiroz M.H. Cury, J.E.R. (2002). "Synthesis and implementation of local modular supervisory control for a manufacturing cell", *Discrete Event Systems: Analysis and Control*, Kluwer Academic Publishers, pp. 103-110. (Proc. WODES 2002).
- Naiqi,W. Zhou, M.(2000). "Resource-oriented Petri nets for deadlock avoidance in automated manufacturing", *International Conference on Robotics and Automation 2000*. Volume: 4, page(s): 3377-3382
- Ramadge, P. J. Wonham, W. M. (1989). "The control of discrete event systems," *Proceedings IEEE, Special Issue on Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 77, pp. 1202-1218.
- Santos, E. (2003) "Contribuições ao Projeto Conceitual de Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizada". Tese de doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil.
- Sackmann, D. Ey, H. Mutz, M., Sauer, J.(2000) "Adaptive Job-Shop Scheduling with Routing and Sequencing Flexibility using Expert Knowledge and Coloured Petri-nets", in: *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Nashville, TN, USA, October 8-11, S. 3212-3217.
- Uzam, M. Wonham, W.M. (2006). "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.
- Vieira, A. D., Cury, J. E. R., Queiroz, M. H. de (2006). "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.
- Wonham, W. M. Ramadge, P. J. (1988). "Modular supervisory control of discrete event systems," *Mathematics of control, signals and systems*, vol. 1, 1, pp.13-30.
- Wu N, Zhou M (2000). "Resource Oriented Petri Nets for deadlock avoidance in automated manufacturing", *International Conference on Robotics and Automation 2000*. Volume: 4, p 3377-3382.
- Zimmerman, A. (1994). "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.