

APLICAÇÃO DA TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MANUFATURA MULTI PRODUTOS

DANIEL B. SILVA¹, EDUARDO A. P. SANTOS², AGNELO D. VIEIRA²,

MARCO A. B. DE PAULA²

¹ *Departamento de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

² *Laboratório de Automação e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica do Paraná*

CURITIBA PR 80215-901 BRASIL

E-mails: balieiro@utfpr.edu.br, eduardo.portela@pucpr.br, agnelo.vieira@pucpr.br, marco.buseti@pucpr.br

Abstract— This paper presents an approach for modeling a physical system and its required specifications for a multi-product manufacturing system applying Supervisory Control Theory (SCT). The analyzed systems have the capacity of simultaneously processing various types of products, always following their specified production sequences. The systematization of the modeling plans to facilitate physical system and control logic reconfiguration, common and necessary aspects in these types of systems. To validate the proposed approach, modeling, synthesis and implementation of the control logic are developed for a real manufacturing system.

Keywords: Discrete-event systems, Supervisory control theory, Flexible manufacturing systems, Programmable logic controller, Flexible routings.

Resumo: Este trabalho apresenta uma proposta de sistematização da modelagem do sistema físico e das especificações de controle dos sistemas de manufatura multi produtos para a aplicação da Teoria de Controle Supervisório (TCS). Os sistemas tratados no presente trabalho têm a capacidade de processar simultaneamente diversos produtos, de acordo com seus roteiros de fabricação. A sistematização da modelagem visa atender aos propósitos de facilitação da reconfiguração dos sistemas físicos e da lógica de controle, aspecto comum e necessário a este tipo de sistema. Para testar a abordagem proposta, é realizada a modelagem, a síntese e a implementação da lógica de controle em um sistema de manufatura real.

Palavras-chave— Sistemas a eventos discretos, Teoria de controle supervisório, Sistemas flexíveis de manufatura, Controladores lógicos programáveis, Rotas flexíveis.

1. Introdução

Os sistemas de manufaturas são compostos de vários subsistemas que se interagem através de regras de controle específicas. À medida que o número destes subsistemas aumenta, torna-se tarefa complexa a concepção de uma lógica de controle que coordene de forma adequada as atividades correlatas. Em sistemas multi produtos essa questão torna-se particularmente importante e complexa. Neste tipo de sistema, vários produtos são processados simultaneamente de acordo com as rotas de produção, havendo possível compartilhamento de recursos. Esse fato por si só aumenta o esforço na elaboração de uma adequada lógica de controle (Ramirez-Serrano *et al.* 2000).

Também, reconfigurações são necessárias sempre que ocorre a inserção de um novo produto ou mudanças de leiaute. Como exemplo cita-se a reconfiguração dos sistemas de rotas utilizados para o transporte de peças ou produtos (Gouyon *et al.*, 2004a). De acordo com Chandra *et al.* (2003) e Hasdemir *et al.* (2004) as estratégias para concepção da lógica de controle destes sistemas são fundamentalmente intuitivas. Neste sentido, uma estruturação na fase de concepção do projeto lógico é fundamental

no projeto e reconfiguração dos sistemas. De acordo com Ramirez-Serrano *et al.* (2000), o roteamento de peças realizado pelo sistema de transporte é um importante problema de controle, que define a utilização e disponibilidade dos recursos das células de manufatura. Neste sentido, Gouyon *et al.* (2004a e 2004b) utilizam uma abordagem formal para a síntese de controladores, que combinam os aspectos dirigidos ao produto e as alternativas de rotas do processo de manufatura.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo fundamental sistematizar a modelagem do sistema físico e das especificações a serem impostas em sistemas multi produtos. Para tanto será utilizada a Teoria de Controle Supervisório, proposta por Ramadge e Wonham (1987) e a abordagem Modular Local (Queiroz e Cury, 2000) como ferramenta formal de projeto da lógica de controle. A sistemática apresentada explora a modularidade física dos sistemas de manufatura e das especificações de controle, com o objetivo de facilitar modificações nos modelos em casos de mudanças de rotas ou leiaute. O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: na Seção 2, são apresentados os fundamentos da Teoria de Controle Supervisório e da abordagem Modular Local; na Seção 3, é apresentado e descrito

o sistema flexível de manufatura a ser modelado; na Seção 4, é apresentada a modelagem do sistema físico; na Seção 5, são apresentadas as especificações de controle e os supervisores modulares; na Seção 6, é descrita de forma sucinta a arquitetura de controle utilizada; na Seção 7, são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. Teoria de Controle Supervisório e Controle Modular Local

A Teoria de Controle Supervisório (TCS) foi desenvolvida com o objetivo de prover uma metodologia formal para a síntese automática de controladores para Sistemas a Eventos Discretos (Ramadge e Wonham, 1989).

A TCS faz uma distinção clara entre o sistema a ser controlado, denominado planta, e a entidade que o controla, que recebe o nome de supervisor. A planta é um modelo que reflete o comportamento fisicamente possível dos 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 confinar seus comportamentos àqueles que correspondem a uma dada especificação.

Na TCS, o comportamento livre da planta física é representado por um autômato G , sendo $G=(\Sigma, Q, \delta, q_0, Q_m)$, onde Σ é o alfabeto de eventos; Q , o conjunto de estados; $\delta:Q \times \Sigma \rightarrow Q$, a função de transição de estados; $q_0 \in Q$ é o estado inicial e $Q_m \subseteq Q$ o conjunto de estados marcados. O conjunto de eventos Σ é dividido em dois sub-conjuntos, sendo o sub-conjunto dos eventos controláveis $\Sigma_c \subseteq \Sigma$, e o sub-conjunto dos eventos não-controláveis $\Sigma_u \subseteq \Sigma$. O conjunto Σ^* representa todas as possíveis cadeias de eventos que G pode gerar, incluindo a *palavra vazia* ou cadeia nula ϵ . Sendo assim, a planta gera dois conjuntos de linguagem: a linguagem gerada $L(G)$ representa o *comportamento livre* de G ; e a linguagem marcada $L_m(G)$ representa as tarefas completadas ou o *comportamento marcado* de G . O comportamento em malha fechada é obtido a partir da imposição de especificações E_j , $j \in J = \{0, \dots, m\}$, ao comportamento livre da planta.

Na TCS, um conjunto de especificações E_j gera um supervisor que observa e controla toda a planta (abordagem monolítica). Na abordagem modular (Wonham e Ramadge, 1989), cada especificação determina a existência de um supervisor modular. 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 Lo-

cal. 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 $G_{loc,l}$, $l \in L = \{0, \dots, w\}$. 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. Neste estudo uma planta local pode ser afetada por mais de uma especificação como se observa na tabela 1 da seção 5.

A síntese de um supervisor modular local $S_{loc,j}$, é realizada considerando a máxima linguagem controlável contida em $\text{sup}C(E_{loc,j}, G_{loc,l})$. Os supervisores locais poderão ser representados por um par $(S_{loc,j}, \Phi_j)$ sendo $S_{loc,j}=(\Sigma_j, Q_j, \delta_j, q_{0j}, Q_{mj})$ o autômato correspondente. A função de desabilitação de eventos Φ_j , deve sempre habilitar os eventos não-controláveis sendo assim definida como $\Phi_j: X_j \times \Sigma \rightarrow \{\text{habilita}, \text{desabilita}\}$.

De acordo com Queiroz e Cury (2002), o teste de modularidade do conjunto de supervisores modulares garante que a abordagem modular não causa qualquer perda de desempenho em relação à abordagem monolítica.

3. Sistema Flexível de Manufatura

O sistema tratado no presente trabalho é classificado, de acordo com Groover (2001), como um sistema automatizado de rotas variáveis.

Uma configuração genérica desse tipo de sistema de manufatura é apresentada na figura 1. Observa-se um número n de máquinas M_t , sendo $t=1 \dots n$, representando uma estação de trabalho. Em cada estação de trabalho é possível realizar diferentes operações sobre as peças. O transporte de peças entre os *buffers* B_z , com $z = \{0, \dots, (2t+1)\}$, das estações é realizado por um sistema de transporte (por exemplo, um robô). Cada estação de trabalho possui um *buffer de entrada* $[B_{(2t-1)}]$ e um *buffer de saída* $[B_{(2t)}]$, com capacidade unitária. A esteira de entrada realiza o transporte de peças brutas para o processo e possui apenas um *buffer de saída* B_0 com capacidade unitária. O transporte de produtos acabados é realizado pela esteira de saída que possui capacidade infinita.

Para o caso exemplo, será considerado um sistema com três máquinas ($n=3$, $z=\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$) e o processamento de dois diferentes tipos de peças identificadas como tipo A e B.

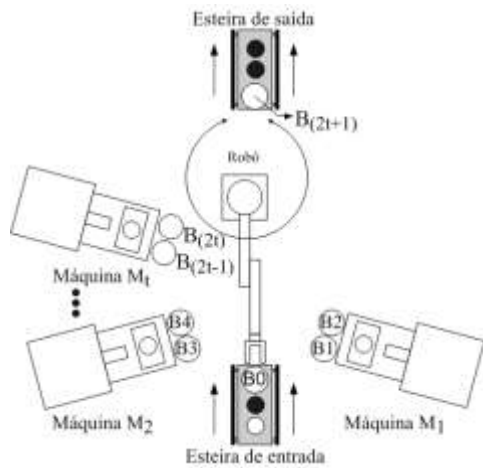


Figura 1: Sistema automatizado de rotas variáveis (Groover, 2001).

4. Modelagem do Sistema Físico

Para o modelo das máquinas M_i , considera-se o número de operações que cada uma realizará durante o processo. O plano de processo define que a peça tipo A terá uma seqüência de operações que solicita as máquinas M_1 , M_2 e M_3 , respectivamente nesta ordem. A peça tipo B solicitará para a sua manufatura as máquinas M_1 e M_3 , respectivamente e nesta ordem. A figura 2 apresenta os autômatos G_1 , G_2 e G_3 correspondentes aos modelos das máquinas M_1 , M_2 e M_3 , respectivamente.

Os estados iniciais dos autômatos mostrados na figura 2 representam as máquinas M_i em repouso. Os estados 1 e 2 representam as máquinas em operação. Os eventos α_{mtA} e α_{mtB} , denotam o início de processamento das peças A e B, respectivamente. Os eventos β_{mtA} e β_{mtB} , denotam o fim de processamento das peças A e B, respectivamente. Como regra geral os eventos denotados por α correspondem aos eventos controláveis, e os eventos denotados por β correspondem aos eventos não-controláveis.

O modelo da esteira transportadora de entrada, G_4 , é apresentado na figura 3. O evento α_{es} representa o início de operação da esteira. Os eventos β_{pA} e β_{pB} , representam a chegada de uma peça tipo A ou B, respectivamente, ocasionando a parada da esteira.

No sistema tratado, o robô pode movimentar-se livremente entre todas as posições de entrada e saída das máquinas. Para evitar movimentos desnecessários e tornar o sistema de transporte mais eficiente, são permitidos dois tipos de deslocamentos:

- Estando o transportador em um *buffer de saída*, somente será permitido o seu deslocamento em direção a um *buffer de entrada*.
- Estando o transportador em um *buffer de entrada*, somente será permitido o seu deslocamento em direção a um *buffer de saída*.

Neste estudo foram analisados outros modelos, que em virtude de suas limitações não serão conside-

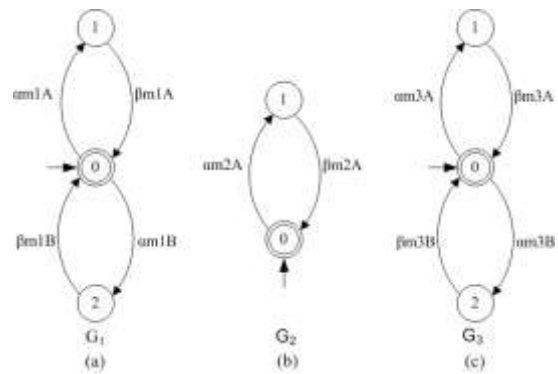


Figura 2: Autômatos: a) G_1 , b) G_2 , c) G_3 .

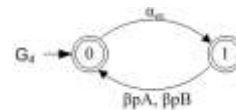


Figura 3: Modelo da esteira transportadora G_4 .

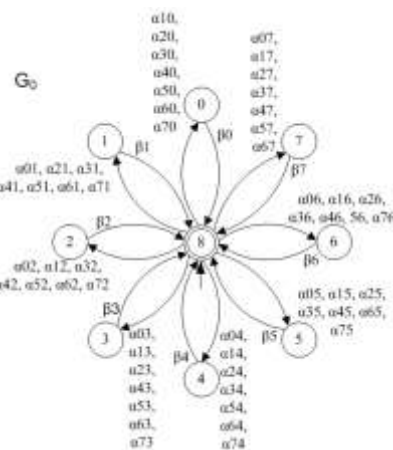


Figura 4: Modelo do sistema de transporte G_0 .

rados. O modelo a ser adotado para o sistema de transporte é apresentado na figura 4.

Este modelo representa o transportador em dois possíveis estados: em repouso, em alguma posição de *buffer*, ou em movimento entre dois possíveis *buffers*. Os eventos α_{xy} representam o início do deslocamento do sistema de transporte do *buffer x* para o *buffer y*. Os eventos β_z , representam a chegada do sistema de transporte no *buffer z*. Neste caso, considera-se para o estado inicial, o transportador parado, não especificando o *buffer*. Os estados 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 representam o transportador em movimento, e em direção aos *buffers B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6 e B7* respectivamente.

5. Modelagem das Especificações de Controle e Síntese dos Supervisores

Nesta seção é apresentado o conjunto de especificações E_j , $j \in J = \{0, \dots, m\}$, necessárias para a coordenação geral do sistema de manufatura. Estas especificações podem ser generalizadas em três conjuntos distintos. O primeiro conjunto diz respeito ao

comportamento individual de cada *buffer*, além da coordenação do fim de uma atividade de transporte ou processamento com a próxima atividade. O segundo conjunto refere-se à coordenação dos deslocamentos do sistema de transporte e depende exclusivamente do plano de processo. O terceiro conjunto refere-se às situações em se deve modelar o comportamento simultâneo de dois *buffers*. Tal situação ocorre quando as diferentes peças que saem de um único subsistema têm como destino uma única máquina. No caso tratado estes três conjuntos são especificados como se segue.

O primeiro conjunto de especificações tem por objetivo geral a coordenação das atividades em função da presença ou ausência de peças nos *buffers* B_z , com $z = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ e } 7\}$. Este conjunto é formado pelas especificações apresentadas na figura 5. De forma geral, estas especificações estabelecem os seguintes requisitos:

- Evitar a ocorrência de *overflow* e *underflow* dos *buffers*;
- Reconhecer como tarefa completa somente quando um determinado *buffer* estiver vazio;
- Coordenar o início e final de operação dos subsistemas, máquinas M_i e esteira, com o sistema de transporte.

O estado inicial destas especificações representa *buffer* sem peça, e o estado de número 1 representa *buffer* com peça. As especificações de E_0 à E_6 representam o comportamento dos *buffers* B_0 à B_6 , respectivamente. A especificação E_2 mostrada na figura 5c, por exemplo, estabelece os seguintes requisitos:

- Evitar que o sistema de transporte se desloque em direção ao *buffer* B_2 , se o mesmo estiver vazio;
- Evitar o início de operação da máquina M_1 , se o *buffer* B_2 estiver com peça A ou B;
- Evitar que o sistema de transporte se desloque, a partir do *buffer* B_2 , em direção aos *buffers* B_3 ou B_5 , sem peças A ou B.

As especificações E_7 e E_8 coordenam o final de processamento de peça tipo A ou B, pela máquina M_1 , com o início de operação do sistema de transporte. A especificação E_9 determina o início de operação da máquina M_3 , em função da presença de peça tipo A no *buffer* B_5 .

O segundo conjunto é formado por uma única especificação, que impõe a correta seqüência de processamento das peças tipo A e B. Esta especificação restringe o comportamento do sistema de transporte aos deslocamentos necessários ao cumprimento das rotas de produção pré-estabelecidas. Esta especificação é denominada E_{10} e é ilustrada na figura 6. No estado não acessível 8 são colocados em auto laço os eventos correspondentes aos deslocamentos não desejados.

O terceiro conjunto é formado por uma única especificação que tem por objetivo coordenar o comportamento conjunto dos subsistemas esteira, máquina M_1 e sistema de transporte. Essa especi-

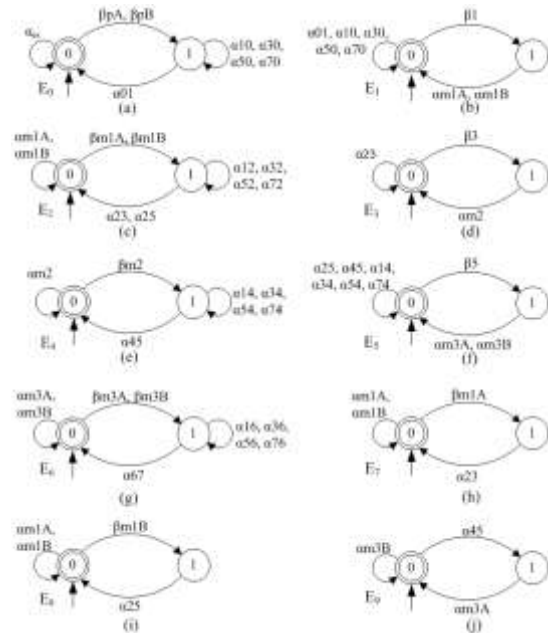


Figura 5: a) E_0 , b) E_1 , c) E_2 , d) E_3 , e) E_4 , f) E_5 , g) E_6 , h) E_7 , i) E_8 , j) E_9 .

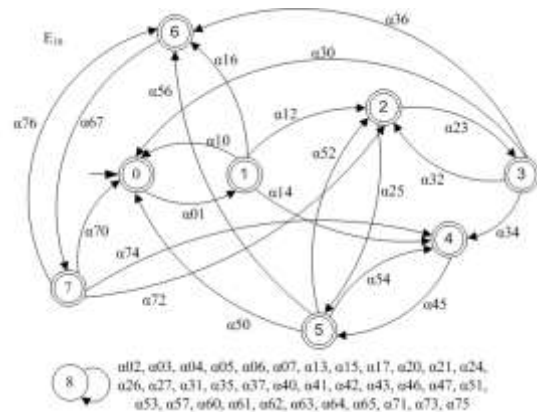


Figura 6: Especificação do sistema de transporte E_{10} .

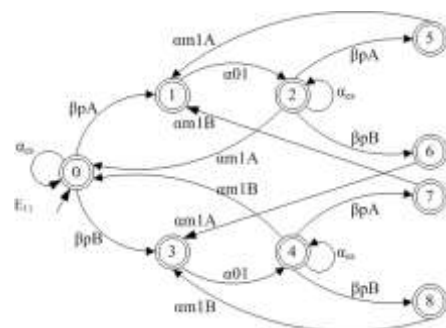


Figura 7: Especificação para a coordenação conjunta da esteira, máquina M_1 e sistema de transporte.

cação, no caso geral, deve sempre ser construída considerando-se o equipamento de alimentação de peças (no caso tratado, a esteira), o sistema de transporte e as primeiras máquinas de cada roteiro de produção. De acordo com os roteiros de produção do exemplo tratado, as duas peças A e B devem ser processadas inicialmente pela mesma máquina – M_1 . Desta forma, é possível operar o sistema com uma peça sendo processada em M_1 , uma peça no *buffer*

c1	c2	c3	c4
$G_{10c0}=G_0\ G_4$	$CC_0=\{SM_{E0}, G_0, G_4\}$	27x209	2x126
$G_{10c1}=G_0\ G_1$	$CC_1=\{SM_{E1}, G_0, G_1\}$	51x398	2x122
	$CC_2=\{SM_{E2}, G_0, G_1\}$	36x274	2x126
	$CC_7=\{SM_{E7}, G_0, G_1\}$	36x289	2x131
	$CC_8=\{SM_{E8}, G_0, G_1\}$	36x289	2x131
$G_{10c2}=G_0\ G_2$	$CC_3=\{SM_{E3}, G_0, G_2\}$	34x265	2x123
	$CC_4=\{SM_{E4}, G_0, G_2\}$	27x200	2x125
$G_{10c3}=G_0\ G_3$	$CC_5=\{SM_{E5}, G_0, G_3\}$	36x277	2x122
	$CC_6=\{SM_{E6}, G_0, G_3\}$	36x289	2x127
	$CC_9=\{SM_{E9}, G_0, G_3\}$	54x435	2x133
$G_{10c5}=G_0$	$CC_{10}=\{SM_{E10}, G_0\}$	16x29	8x29
$G_{10c4}=G_0\ G_4\ G_1$	$CC_{11}=\{SM_{E11}, G_0, G_4, G_1\}$	324x2805	9x602

B_0 , e outra no *buffer* B_1 . A especificação em questão é apresentada na figura 7.

Com este conjunto de 12 especificações, é possível obter um supervisor monolítico de 24466 estados e 77719 transições. No entanto, na abordagem modular local, tem-se um conjunto de 12 supervisores modulares. A realização do teste de modularidade destes 12 supervisores, através da composição síncrona dos mesmos, revela a não ocorrência de bloqueio. Deste modo pode-se realizar a implementação. Nos cálculos para a obtenção dos supervisores e no teste de modularidade foi utilizada a ferramenta computacional TCT (Wonham, 1999). As plantas locais, afetadas por cada um destes supervisores, são definidas na tabela 1. De acordo com Vieira *et al.* (2004), o conjunto planta local e supervisor modular determina uma célula de controle identificada como CC_j , de forma que $j \in J = \{0, \dots, m\}$.

Na tabela 1, a coluna c1 apresenta a composição das plantas locais $G_{loc, j}$, enquanto que na coluna c2 são representadas as células de controle. Na coluna c3 são apresentados os números de estados e transições dos supervisores modulares. A coluna c4 informa o número de estados e transições dos supervisores modulares reduzidos. Um supervisor reduzido será identificado como SM_{Ej} , representado por um par (SM_{Ej}, Φ_{Ej}) , conforme apresentado na tabela 2. O conjunto Φ representa as ações de controle, ou função de desabilitação de eventos controláveis, de cada um dos supervisores reduzidos, nos seus respectivos estados. Estes supervisores reduzidos terão um número menor ou igual de estados, porém possuem a

SM_{E0}	$\Phi_{E0}(0)=\{\alpha 01, \alpha 10, \alpha 30, \alpha 50, \alpha 70\}; \Phi_{E0}(1)=\{\alpha_{es}\}$
SM_{E1}	$\Phi_{E1}(0)=\{\alpha_{m1A}, \alpha_{m1B}\}; \Phi_{E1}(1)=\{\alpha 01, \alpha 10, \alpha 30, \alpha 50, \alpha 70\}$
SM_{E2}	$\Phi_{E2}(0)=\{\alpha 12, \alpha 32, \alpha 52, \alpha 72, \alpha 23, \alpha 25\};$ $\Phi_{E2}(1)=\{\alpha_{m1A}, \alpha_{m1B}\}$
SM_{E3}	$\Phi_{E3}(0)=\{\alpha_{m2}\};$ $\Phi_{E3}(1)=\{\alpha 23\}$
SM_{E4}	$\Phi_{E4}(0)=\{\alpha 14, \alpha 34, \alpha 54, \alpha 74, \alpha 45\}; \Phi_{E4}(1)=\{\alpha_{m2}\}$
SM_{E5}	$\Phi_{E5}(0)=\{\alpha_{m3A}, \alpha_{m3B}\}; \Phi_{E5}(1)=\{\alpha 14, \alpha 34, \alpha 54, \alpha 74, \alpha 45\}$
SM_{E6}	$\Phi_{E6}(0)=\{\alpha 16, \alpha 36, \alpha 56, \alpha 76, \alpha 67\};$ $\Phi_{E6}(1)=\{\alpha_{m3A}, \alpha_{m3B}\}$
SM_{E7}	$\Phi_{E7}(0)=\{\alpha 23\}; \Phi_{E7}(1)=\{\alpha_{m1A}, \alpha_{m1B}\}$
SM_{E8}	$\Phi_{E8}(0)=\{\alpha 25\}; \Phi_{E8}(1)=\{\alpha_{m1A}, \alpha_{m1B}\}$
SM_{E9}	$\Phi_{E9}(0)=\{\alpha_{m3A}\}; \Phi_{E9}(1)=\{\alpha 45, \alpha_{m3B}\}$
SM_{E10}	$\Phi_{E10}(0)=\{\alpha 10, \alpha 30, \alpha 50, \alpha 70, \alpha 12, \alpha 32, \alpha 52, \alpha 72, \alpha 14, \alpha 34, \alpha 54, \alpha 74, \alpha 16, \alpha 36, \alpha 56, \alpha 76, \alpha 23, \alpha 25, \alpha 45, \alpha 67\};$ $\Phi_{E10}(1)=\{\alpha 01, \alpha 30, \alpha 50, \alpha 70, \alpha 32, \alpha 52, \alpha 72, \alpha 34, \alpha 54, \alpha 74, \alpha 36, \alpha 56, \alpha 76, \alpha 23, \alpha 25, \alpha 45, \alpha 67\};$ $\Phi_{E10}(2)=\{\alpha 01, \alpha 10, \alpha 30, \alpha 50, \alpha 70, \alpha 12, \alpha 32, \alpha 52, \alpha 72, \alpha 14, \alpha 34, \alpha 54, \alpha 74, \alpha 16, \alpha 36, \alpha 56, \alpha 76, \alpha 45, \alpha 67\};$ $\Phi_{E10}(3)=\{\alpha 01, \alpha 10, \alpha 50, \alpha 70, \alpha 12, \alpha 52, \alpha 72, \alpha 14, \alpha 54, \alpha 74, \alpha 16, \alpha 56, \alpha 76, \alpha 23, \alpha 25, \alpha 45, \alpha 67\};$ $\Phi_{E10}(4)=\{\alpha 01, \alpha 10, \alpha 30, \alpha 50, \alpha 70, \alpha 12, \alpha 32, \alpha 52, \alpha 72, \alpha 14, \alpha 34, \alpha 54, \alpha 74, \alpha 16, \alpha 36, \alpha 56, \alpha 76, \alpha 23, \alpha 25, \alpha 67\};$ $\Phi_{E10}(5)=\{\alpha 01, \alpha 10, \alpha 30, \alpha 70, \alpha 12, \alpha 32, \alpha 72, \alpha 14, \alpha 34, \alpha 74, \alpha 16, \alpha 36, \alpha 76, \alpha 23, \alpha 25, \alpha 67, \alpha 45\};$ $\Phi_{E10}(6)=\{\alpha 01, \alpha 10, \alpha 30, \alpha 50, \alpha 70, \alpha 12, \alpha 32, \alpha 52, \alpha 72, \alpha 14, \alpha 34, \alpha 54, \alpha 74, \alpha 16, \alpha 36, \alpha 56, \alpha 76, \alpha 23, \alpha 25, \alpha 45\};$ $\Phi_{E10}(7)=\{\alpha 01, \alpha 10, \alpha 30, \alpha 50, \alpha 12, \alpha 32, \alpha 52, \alpha 14, \alpha 34, \alpha 54, \alpha 16, \alpha 36, \alpha 56, \alpha 23, \alpha 25, \alpha 45, \alpha 67\}$
SM_{E11}	$\Phi_{E11}(0)=\{\alpha_{m1A}, \alpha_{m1B}, \alpha 01\};$ $\Phi_{E11}(1)=\Phi_{E11}(3)=\{\alpha_{m1A}, \alpha_{m1B}, \alpha_{es}\};$ $\Phi_{E11}(2)=\{\alpha_{m1B}, \alpha_{es}\}; \Phi_{E11}(4)=\{\alpha_{m1A}, \alpha_{es}\};$ $\Phi_{E11}(5)=\Phi_{E11}(6)=\{\alpha 01, \alpha_{m1B}, \alpha_{es}\};$ $\Phi_{E11}(7)=\Phi_{E11}(8)=\{\alpha 01, \alpha_{m1A}, \alpha_{es}\}$

mesma ação de controle sobre o comportamento da planta livre local, que os correspondentes supervisores modulares locais. As funções de transição de estados dos supervisores reduzidos SM_{Ej} e das especificações E_j , com $j=\{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9$ e $11\}$, são exatamente iguais, diferindo apenas para o caso em que $j=10$.

6. Implementação do Sistema de Controle

A planta utilizada no presente trabalho encontra-se no Laboratório de Automação e Sistemas I da PUCPR. Foi utilizado um robô Comau (COMAU) como sistema de transporte e, simulando o comportamento das máquinas, um conjunto de sensores e atuadores pneumáticos. Um CLP Siemens S7-317 (SIEMENS) e o controlador do robô foram utilizados como plataformas de controle do sistema físico. A arquitetura de controle utilizada é a proposta por Queiroz e Cury (2002) e Vieira *et al.* (2006), sendo formada por três níveis: Supervisores Modulares, Sistema Produto e Sequências Operacionais. No nível denominado "Supervisores Modulares" (SM) é implementado o conjunto de autômatos que representam os supervisores sintetizados. O conjunto de estados ativos destes autômatos é determinado pela

linguagem gerada no sistema produto. Em função deste conjunto de estados são estabelecidas desabilitações de eventos controláveis.

Os níveis denominados “Sistema Produto” (SP) e “Seqüências Operacionais” (SO) atuam como uma interface entre o modelo previsto pela TCS e o sistema físico. Nesta estrutura de controle há uma seqüência operacional diretamente relacionada a cada módulo do sistema produto. Os níveis SM, SP e SO foram implementados em um único CLP Siemens S7-317 através de *SFCs* (Sequential Functions Charts) de acordo com as normas da *International Standart* IEC 61131-3 (IEC, 2003). A conversão dos autômatos em código de CLP foi realizada de forma manual seguindo o modelo Vieira *et al.* (2006).

7 Conclusões

A utilização da TCS e da abordagem modular local mostrou-se adequada para a concepção da lógica de controle em sistemas de manufatura multi produtos. Identifica-se como uma das principais contribuições deste artigo justamente a concepção de especificações para sistemas com roteamento de produtos. Possíveis modificações nas rotas dos produtos ou mesmo mudanças no leiaute do sistema físico podem ser tratados de forma a não comprometer todo o desenvolvimento realizado. As alterações na lógica de controle serão processos localizados, possibilitando a re-utilização das estruturas que não necessitam ser modificadas.

Também, o modelo Queiroz e Cury (2002) e a extensão proposta por Vieira *et al.* (2006), mostraram-se adequadas para os propósitos de flexibilidade da lógica de controle dos sistemas de manufatura. Os testes realizados em laboratório comprovam a eficiência de tais modelos, uma vez que o plano de processo foi alcançado com sucesso.

Considerando as perspectivas de trabalhos futuros, é desejável ampliar o conjunto de especificações a sistemas com roteamentos mais complexos, e com outros tipos de sistemas de transporte.

Referências Bibliográficas

Chandra, V., Huang, Z., Kumar, R., (May 2003). Automated Control Synthesis for an Assembly Line Using Discrete Event System Control Theory *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* Vol.33 N°02.

COMAU, <http://www.comau.com.br>

Gouyon, D., Petin, J.F., Morel, G., (2004a). Control Synthesis for Product-Driven Automation *Proceedings IFAC*.

Gouyon, D., Petin, J.F., Morel, G., (July 2004b). Pragmatic approach for modular control synthesis and implementation *International Journal of Production Research* Vol.42, N°14,

Groover, M.P., (2001). Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing Ed. Prentice Hall 2ª ed. New Jersey.

Hasdemir, T., Kurtulan, S., Gören, L., (2004). Implementation of Local Modular Supervisory Control for pneumatic system using PLC 7th *International Workshop on Discrete Event Systems IFAC*.

IEC (2003). International Standart – *Programmable controllers – part3: Programming languages*. International Electrotechnical Commission.

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, Ghent, Belgium).

Queiroz, M. H., Cury, J. E. R., (Agosto 2002). Controle Supervisório Modular de Sistemas de Manufatura. *Revista Controle & Automação* Vol.13 N°02.

Ramadge, P. J., Wonham, W. M., (1987). Supervisory control of a class of discrete event processes *SIAM Journal on Control and Optimization* Vol. 25 N° 01.

Ramadge, P. J.; Wonham, W. M., (1989). The control of discrete event systems *Proceedings of IEEE, Special Issue on Discret Event Dynamics Systems*.

Ramirez-Serrano, A., Benhabib, B., Sriskandarajah, C. (December 2000). Automated-Based Modeling and Control Synthesis for Manufacturing Workcells with Part-Routing Flexibility *Transactions on Robotics and Automation IEEE*, vol. 16, N° 6.

SIEMENS, Automation and Drives, <http://www.automation.siemens.com>

Vieira. A.D., Cury, J.E.R., Queiroz, M.H., (2004). Distributed Supervisory Control of Discrete Event Systems Based on Local Modular Control *IV Induscon Joinville*.

Vieira. A.D., Cury, J.E.R., Queiroz, M.H., (Outubro 2006). Um modelo para implementação de controle supervisório em Controladores Lógico Programáveis. *Congresso Brasileiro de Automática 2006*.

Wonham, W. M., Notes on control of discrete event systems. Course notes for ECE 1636F/1637S. *Dept. of Electrical and Computer Engineering. University of Toronto, Canada, 1999.*