

# UM ARCABOUÇO PARA MODELAGEM DE SISTEMAS DE MANUFATURA UTILIZANDO REDES DE PETRI COLORIDAS E REÚSO DE MODELOS

LEANDRO DIAS DA SILVA, ANGELO PERKUSICH E ANA LUÍSA NÓBREGA DISTÉFANO

*Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal da Paraíba  
Caixa Postal 10105, 58109-970 - Campina Grande - PB - Brasil*

**Resumo**— Com o aumento da complexidade dos sistemas de produção devido as exigências de um mercado globalizado, está se tornando cada vez mais necessário o desenvolvimento de técnicas e métodos para projetar e validar os mesmos. Este desenvolvimento deve ser realizado de forma rápida, sistemática, e segura para que se tornem ágeis e flexíveis. Métodos formais, como redes de Petri, têm sido aplicados nesse contexto a algum tempo e já apresenta alguns resultados. Aliado a isso, temos a possibilidade de reusar partes de outros projetos bem sucedidos, o que leva a uma redução do tempo de desenvolvimento, além de tornar o modelo mais seguro. Nesse trabalho, apresentamos uma solução de desenvolvimento sistemático de modelos de *sistemas flexíveis de manufatura* suportando reuso de modelos de redes de Petri.

**Abstract**— The modeling of flexible manufacturing systems (FMS) is increasing in complexity due to the flexibility and agility requirements imposed by market needs. The application of formal methods such as Petri nets have been applied in order to cope with this modeling complexity. Although many modeling methods and techniques have been introduced, reuse of past experiences, models, is not very common. Reuse of models can be applied in order to increase the productivity of flexible manufacturing systems designers. In this paper we introduce a framework to build Coloured Petri models for flexible manufacturing systems.

**Key Words**— Coloured Petri Nets, Flexible Manufacturing Systems, Reuse of Models.

## 1 Introdução

Atualmente o aumento da demanda e a exigência de maior diversidade de produtos, têm tornado os sistemas de produção mais complexos e exigido alterações significativas nestes para atender a esses requisitos. Para lidar com esse novo desafio, esses sistemas precisam ser ágeis e flexíveis. Com isso, novas tecnologias foram introduzidas no projeto, implementação e manutenção destes sistemas, dando origem aos Sistemas Flexíveis de Manufatura (SFM).

Para atender aos requisitos de flexibilidade e agilidade dos SFM, deve-se dedicar uma maior atenção à fase de modelagem, pois uma má estruturação nessa etapa pode comprometer a flexibilidade e os objetivos do sistema. Então, é desejável se dispor de métodos sistemáticos para diminuir o esforço de modelagem, minimizando o número de erros.

A aplicação de métodos formais, mais precisamente redes de Petri (Murata, 1989), na modelagem de SFM têm sido muito pesquisada e vários resultados têm sido obtidos conforme podemos observar na literatura (Proth & Xie, 1997; Zhou & Dicesare, 1993; Zhou, 1997; Dicesare et al., 1993; Desrochers & Al-Jaar, 1994; Zhou & Venkatesh, 1999; Manoel Silva & Pingaud, 1998), mostrando que o tema é de grande interesse tanto para a academia quanto para a indústria. Como vantagens de se utilizar redes de Petri na modelagem, análise, e simulação de sistemas, podemos citar a facilidade de capturar as características estruturais, modelagem de propriedades como conflitos, sincronização, não-determinismo, detecção de impasses. Além disso, redes de Petri têm uma base matemática e uma representação gráfica, evitando que o projetista tenha que lidar com notações matemáticas difíceis de serem compreendidas, nem tão pouco com descrições textuais ambíguas.

Neste trabalho, utilizamos redes de Petri Colori-

das (CPN) (Jensen, 1992; Jensen, 1997), que integram os conceitos de hierarquia e de cores (tipos de dados). Esses conceitos facilitam a modularização em níveis de abstração e a construção de modelos mais compactos, pois as cores carregam informações que permitem reduzir o tamanho do modelo, sendo, portanto, características importantes no contexto de SFM.

Nas referências citadas anteriormente, várias metodologias e técnicas para modelagem são apresentadas, inclusive, métodos sistemáticos. Entretanto, nenhuma dessas metodologias até agora leva em consideração a prática do reuso de modelos e tratam a modelagem começando sempre do zero. O reuso possibilita que modelos sejam desenvolvidos utilizando-se partes de modelagens bem sucedidas, permitindo que modelos complexos sejam elaborados de forma mais simples, rápida e eficiente, devido à modularização e aproveitamento de esforços de modelagens anteriores.

O objetivo deste trabalho é disponibilizar um ambiente de modelagem que consiste de um repositório de modelos de partes de SFM como, por exemplo, sistemas de transporte e máquinas, e um arcabouço genérico para integração dos modelos recuperados e/ou adaptados. Esse ambiente tem o objetivo de automatizar e sistematizar ao máximo o trabalho de modelagem de SFM, contribuindo para uma diminuição da atual complexidade dessa tarefa e do tempo de desenvolvimento de tais modelos, facilitando o trabalho do projetista.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2 são introduzidos os conceitos mais relevantes relativos ao reuso de modelos. Na Seção 3 introduz-se o arcabouço para reuso e na Seção 4 detalha-se o ambiente de modelagem. Na Seção 5 apresenta-se um estudo de caso e por fim na Seção 6 apresentam-se as conclusões.

<sup>a</sup>Este artigo é parcialmente financiado pelos projetos 465423/2000-0 e 350903/1999-9 do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

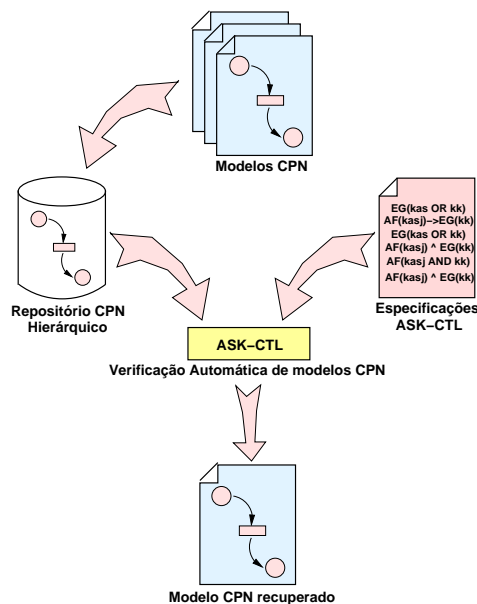


Figura 1. Esquema para armazenamento e recuperação de modelos

## 2 Réuso de Modelos

No contexto de réuso de modelos há a necessidade de um repositório para armazená-los bem como de uma técnica para recuperação dos mesmos. Contudo, esse repositório e essa técnica devem ser padronizados adequadamente para viabilizar o réuso. Nesta seção descreve-se uma solução de réuso de modelos CPN inicialmente introduzida em (Lemos & Perkusich, 2001). Esta solução é constituída de um método de armazenamento e de uma técnica de recuperação. Na Figura 1 apresenta-se um esquema genérico para esta solução.

Os objetos de réuso são modelos CPN. Para armazenar tais modelos em um repositório utiliza-se uma estrutura hierárquica, neste caso também descrita em CPN. Para obter tal estrutura utiliza-se um método introduzido por Lemos em (Lemos & Perkusich, 2001). Para tanto, supõe-se que o conhecimento de modelagem a ser generalizado para uso posterior é bem compreendido pelo projetista, e que ele possa armazenar os modelos passíveis de réuso de acordo com uma classificação em domínios de aplicação. No contexto específico deste artigo podem ser considerados por exemplo o domínio de recursos de transporte e de produção. De fato, o repositório é organizado em uma hierarquia de domínios, aos quais os modelos devem aderir ao serem armazenados. Deve-se observar ainda que o repositório de modelos é de fato um modelo de modelos.

Como mostrado na Figura 1 os modelos armazenados no repositório precisam ser recuperados. Para tanto utiliza-se uma técnica de recuperação de modelos que consiste em identificar os modelos que atendem a uma dada especificação. Neste caso a especificação é descrita por uma lógica temporal denominada ASK-CTL que é integrada ao Design/CPN através de uma biblioteca (Christensen & Mortensen, 1996). Esta lógica foi desenvolvida especialmente para descrever propriedades sobre o comportamento de modelos CPN em termos de proposições sob o

seu espaço de estados. A identificação é feita através da aplicação da técnica de Verificação Automática de Modelos (Clarke et al., 1999; Christensen & Mortensen, 1996). Inicialmente identifica-se que parte do modelo em desenvolvimento pode ser encontrada já modelada no repositório. Recorre-se ao repositório de modelos e identifica-se o domínio de modelos que será alvo da busca. Essa seleção prévia de domínio pode levar a uma redução do espaço de estados, reduzindo o tempo na busca por modelos. Na página relativa ao domínio escolhido há informações pertinentes aos lugares e transições que formam a interface padronizada dos modelos armazenados naquele domínio. Com essas informações, escreve-se a sentença de busca em ASK-CTL expressando um comportamento desejado no modelo a ser recuperado e grava-se esta sentença em um arquivo. Automaticamente, o procedimento verifica cada modelo armazenado sob o domínio indicado e, caso um ou mais destes seja modelo para a especificação da sentença de busca, o projetista será requisitado a informar o nome do arquivo em que será gravado o modelo recuperado. O procedimento não pára até que se tenha verificado todos os modelos do domínio, isso mesmo que já se tenha encontrado um candidato a recuperação, portanto pode-se ter múltiplos resultados para uma única pesquisa.

Na seção seguinte apresentamos como o método e a técnica de réuso introduzida nesta seção podem ser aplicadas ao contexto de sistemas flexíveis de manufatura.

## 3 O Arcabouço Genérico

Nesta seção descrevemos o arcabouço genérico para a modelagem sistemática de SFM com suporte a réuso de modelos de redes de Petri.

### 3.1 O Sistema

O objetivo de disponibilizar um arcabouço é apresentar ao projetista uma visão mais abstrata de um SFM, dividindo este em módulos inerentes a ele como, por exemplo, máquinas e sistema de transporte. Esse modelo é baseado no que foi definido em (de Carvalho Barros, 2000).

Outros módulos também fazem parte de um SFM, mas no presente trabalho estamos interessados em um caso simplificado para mostrar como a proposta em questão pode ser útil ao projeto de SFM e suportar a atividade de réuso. Estes outros módulos podem ser, entre outros, entidades de armazenamento, fluxo de informações, escalonamento, restrições de comportamento (exclusão mútua, por exemplo), e controle.

Com isto temos um cenário onde o projetista precisa apenas selecionar os componentes desejados a partir de um repositório, como foi desenvolvido em (Lemos & Perkusich, 2001) e, se necessário, realizar adaptações no modelo para integrá-lo ao modelo genérico, de acordo com a técnica descrita em (Gorgônio & Perkusich, 2000).

Na figura 2 é apresentado um modelo de sistema de manufatura com duas células com duas máquinas em cada uma. Além disso está definido o transporte interno e externo das células, sendo feitos por meio de esteiras e empilhadeiras, respectivamente. Esta definido também que tanto o sistema quanto as células e

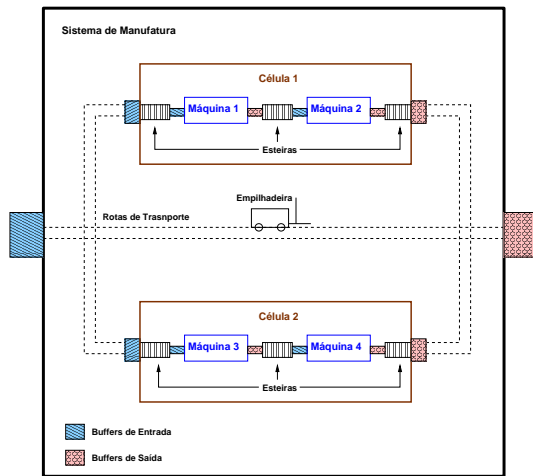


Figura 2. Exemplo de Sistema de Manufatura

máquinas possuem buffers de entrada e saída.

As rotas de produção mostradas são utilizadas para realizar o transporte externo as células que podem ser da entrada do sistema para a entrada de uma das duas células, da saída de uma célula para a entrada da outra ou, ainda, da saída de uma célula para a saída do sistema.

### 3.2 O Modelo

Na Figura 3 podemos ver o modelo do arcabouço. Com este modelo genérico, fica transparente a forma como as entidades são modeladas. Então, podemos definir que um sistema de produção é uma estrutura de células que possuem uma ou mais máquinas, uma seqüência de produção, e uma seqüência de transporte. A seguir detalharemos esse modelo.

Definimos, inicialmente, os tipos de transportes encontrados num sistema deste tipo, a saber: Transporte da entrada do sistema para a entrada de alguma célula; Transporte da entrada da célula para a entrada de alguma máquina pertencente a esta; Transporte da saída de uma máquina para a entrada de outra dentro de uma mesma célula; Transporte da saída de uma máquina para a saída da célula; Transporte da saída da célula para a entrada de outra célula; Transporte da saída de uma célula para a saída do sistema, quando a peça tiver completado sua seqüência de processamento.

Os lugares para o modelo são: SystemIn: Buffer de entrada do sistema; CellIn: Buffer de entrada de célula; MachineIn: Buffer de entrada de máquina; MachineOut: Buffer de saída de máquina; CellOut: Buffer de saída de célula; SystemOut: Buffer de saída do sistema; MachToMach: Escolha de máquina para máquina; MachToCell: Escolha de máquina para célula; CellToCell: Escolha de célula para célula; CellToOut: Escolha de célula para saída do sistema. As transições são: TranspToCellIn: Transporte da entrada do sistema para entrada de célula; TranspToMachineIn: Transporte para entrada da máquina; Mach: Processamento, ou máquinas; MTOM: Transporte da saída de uma máquina para a entrada de outra máquina; TranspToCellOut: Transporte para a saída da célula; CTOC: Transporte de célula para célula; CTOO: Transporte para a saída do sistema; MachToMachChoice: Escolha

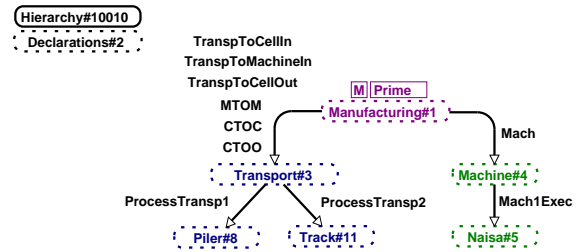


Figura 4. Página da Hierarquia após a Recuperação e Integração

de transporte de máquina para máquina; MachToCellChoice: Escolha de transporte de máquina para saída da célula; CChoice: Escolha de transporte de saída de célula para entrada de outra célula; CellToOutChoice: Escolha de transporte de saída de célula para saída de sistema;

Com redes de Petri coloridas hierárquicas podemos definir transições de substituição que são transições substituídas por um modelo que será uma sub-página da página em que se encontra essa transição. Isso permite que, dentro dos modelos genéricos, uma nova hierarquia modelando especificamente tipos de máquinas reais, ou o funcionamento real de um agente de transporte sejam inseridos, mantendo a estrutura do nível hierárquico acima, caracterizando uma modelagem do tipo refinamento.

A transição Mach é uma transição de substituição para a subpágina onde teremos a interface do arcabouço com os modelos de máquinas a serem integrados. As outras transições serão todas transições de substituição para uma mesma subpágina que será a interface para os sistemas de transporte. O motivo de se ter várias transições para esses sistemas é devido as definições de vários tipos de transportes feitos acima, pois poderemos ter vários modelos diferentes para cada tipo de transporte.

A especificação da seqüência de produção, bem como da seqüência de transporte é informada na marcação inicial da rede. Poderíamos gerar dinamicamente a seqüência de transporte de acordo com a seqüência de produção em tempo de simulação, porém isso acarretou, baseado em alguns testes, uma sobrecarga de processamento, funções, e complexidade nas inscrições, contrariando os objetivos desta proposta genérica. Também foi levado em consideração o escalonamento, que seria muito prejudicado com esta definição dinâmica.

As transições que apresentam o sufixo Choice significam a realização de uma escolha, para se determinar que tipo de transporte será requerido neste ponto, baseado na seqüência de transporte definida na marcação inicial do arcabouço.

Toda a informação de que precisamos será colocada na marcação inicial, o que evita que o projetista tenha que se preocupar com a estrutura da rede. Feito isso, a seqüência de transporte irá definir que caminho percorrer na Figura 3. No segundo nível hierárquico do arcabouço, essa mesma seqüência definirá que subpágina específica para os transportes requisitados será selecionada. No caso da seqüência de produção, no segundo nível será selecionada a sub-página específica para o recurso de produção requisitado. Esta parte tem o objetivo de ser um arcabouço para a modelagem de SFM baseada em reuso de modelos.

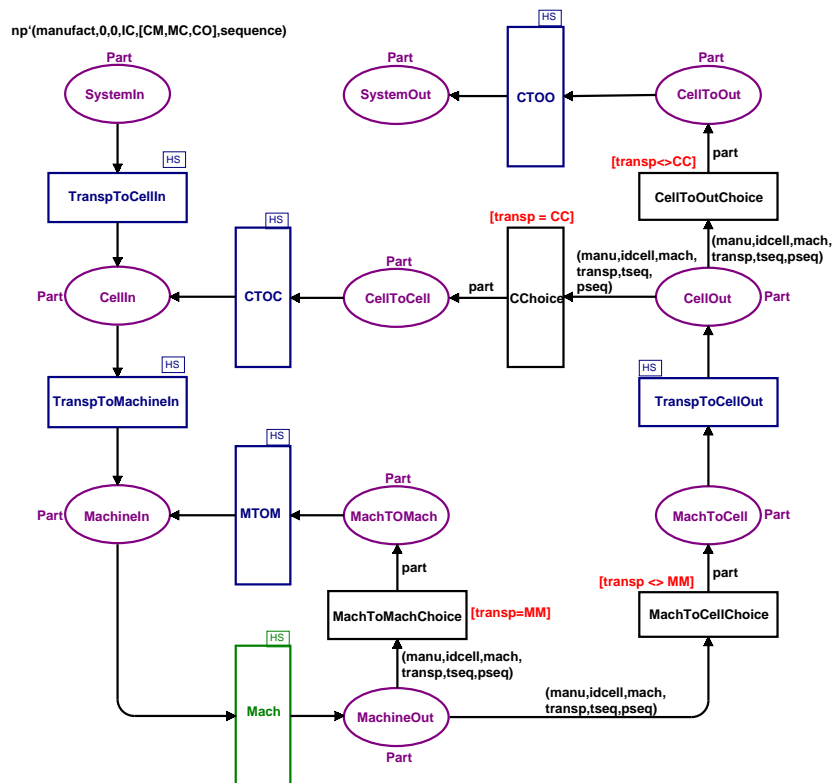


Figura 3. Página Primária do Sistema de Manufatura

#### 4 O Ambiente de Modelage

A seguir, mostraremos como o arcabouço junto com o repositório formam um método sistemático, semi-automático para modelagem de SFM.

O primeiro passo consiste em se definir a seqüência de processamento, que consiste na lista de máquinas e suas habilidades específicas, a seqüência de transporte, que é baseada na seqüência de processamento, além da definição do sistema propriamente dito, ou seja, quais são as células presentes no sistema e que máquinas pertencem a cada célula. Essa informação será colocada no arcabouço como marcação inicial no lugar SystemIn da página primária do modelo, que pode ser vista na Figura 3. Devemos ter, nesse ponto, arquivos com as descrições em lógica temporal(Christensen & Mortensen, 1996; Emerson, 1990) de cada modelo a ser recuperado, conforme descrito em (Lemos & Perkusich, 2001).

Após definido completamente o sistema conforme especificado anteriormente, devemos recuperar os modelos desejados. Isso é feito entrando-se na ferramenta de grafo de ocorrência, representação do espaço de estados, do Design/CPN e avaliando-se a sentença na página de índice do repositório. Esse procedimento recuperará todos os modelo que estiverem presentes no repositório e que suas propriedades forem as descritas pelos arquivos citados anteriormente. Cada modelo recuperado é salvo como um sub-diagrama para futura adaptação e integração.

#### 5 Um Estudo de Caso

Nesta seção, apresentamos um exemplo de como o procedimento e o arcabouço definidos nas seções ante-

riores são utilizados na prática de modelagem de SFM.

Para esse exemplo, definimos dois tipos de transporte: dentro e fora das células. Os transportes do primeiro tipo são: Transporte de uma máquina para outra dentro de uma mesma célula; Transporte de uma máquina para a saída de sua célula; Transporte da entrada da célula para a entrada de uma máquina. Os transportes do segundo tipo são: Transporte da entrada do sistema para a entrada de uma célula; Transporte da saída de uma célula para a entrada de outra célula; Transporte da saída de uma célula para a saída do sistema.

Para modelar os transportes citados acima utilizamos modelos da estrutura de dados pilha, para representar o comportamento de uma empilhadeira, e o de fila para representar uma esteira, que farão os papéis de transporte de fora e de dentro da célula, respectivamente.

Após a recuperação os modelos podem ser adaptados para se comportarem de acordo com as necessidades específicas de cada projeto como, por exemplo, a capacidade da pilha. Conforme dito anteriormente este processo é realizado também de forma automática de acordo com a técnica desenvolvida em (Gorgônio & Perkusich, 2000). Com ou sem adaptação o processo de integração consiste em se adaptar as cores e inscrições no modelo recuperado para que este possa funcionar integrado ao arcabouço.

Na Figura 4 representa-se o sistema já com os modelos recuperados do repositório. Na hierarquia, o primeiro nível Manufacturing representa a página primária do modelo, que pode ser vista na Figura 3. No segundo nível do arcabouço, são encontradas as páginas que representam o sistema de transporte e de produção, que são a interface para os modelos es-

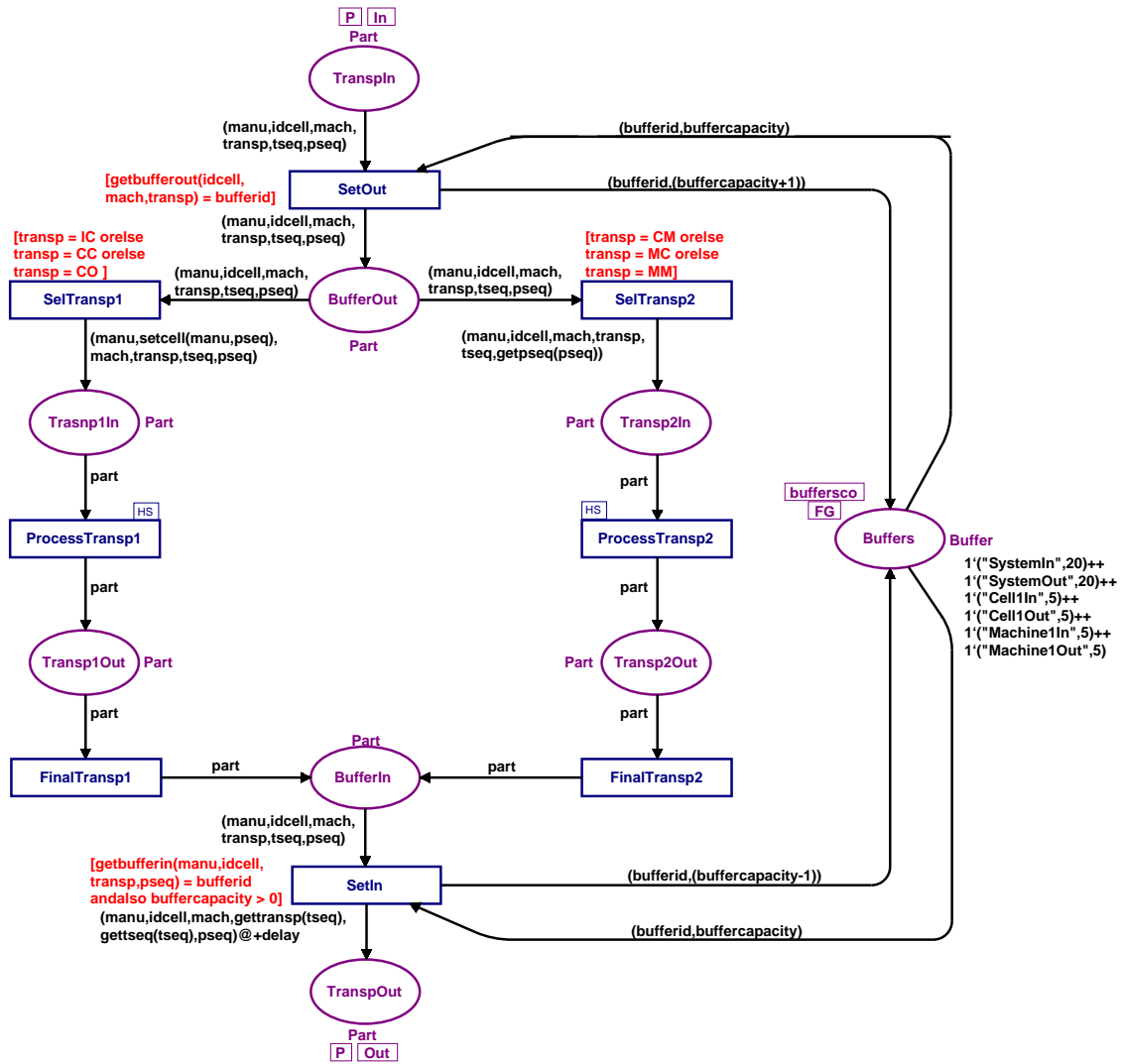


Figura 7. Página do Sistema de Transporte após a Recuperação e Integração

pecíficos das entidades de transporte e produção, respectivamente. Finalmente, o terceiro nível hierárquico apresenta as páginas dos modelos das entidades citadas anteriormente, que foram recuperados do repositório. No caso da figura 4, o terceiro nível engloba as páginas que representam uma esteira, uma empilhadeira, e uma máquina, sendo que os dois primeiros ficam abaixo de Transport enquanto que o último fica abaixo de Machine, que são, conforme descrito anteriormente, a interface entre esses e o arcabouço.

Neste estudo de casos definimos um sistema simples com apenas uma máquina e dois sistemas de transportes. Depois de recuperados os modelos de pilha e fila, recuperamos o modelo da única máquina desejada. Na Figura 4 podemos ver como ficou a hierarquia depois dos processos de recuperação e integração. Para este estudo de caso não foi realizada nenhuma adaptação devido a simplicidade e ao caráter ilustrativo deste exemplo. Nas Figuras 5 e 7, podemos observar como ficou o segundo nível hierárquico do arcabouço, enquanto que na Figura 6 podemos ver o modelo da pilha já integrado ao arcabouço. Este último continua funcionando como uma pilha, só que agora uma pilha de peças.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

A abordagem introduzida neste trabalho permite que um modelo bastante flexível seja elaborado a partir de níveis hierárquicos de abstração. Permite, ainda, que um modelo real de uma máquina, por exemplo, possa ser reutilizado dentro do mesmo modelo em partes diferentes, ou ainda em outro modelo, com a importação do sub-diagrama desejado, caracterizando um reúso em tempo de modelagem.

Por disponibilizar um arcabouço genérico de SFM, o projetista não precisa se preocupar explicitamente com a estrutura do sistema, pois isso é definido na marcação inicial, facilitando a atividade de modelagem de SFM. Apesar de no contexto de manufatura o conceito de reúso ainda não ser muito explorado, muitas são as vantagens encontradas nessa prática. Entre elas, o fato do projetista se preocupar unicamente em escolher os componentes e escrever as sentenças em lógica temporal, quando se utiliza o fato de se ter previamente um arcabouço genérico.

Dessa forma, esse trabalho contribui para facilitar e agilizar o processo de projeto de SFM propondo uma metodologia onde o projetista praticamente não precisa modelar as entidades do sistema.

A adaptação é realizada através da geração de um

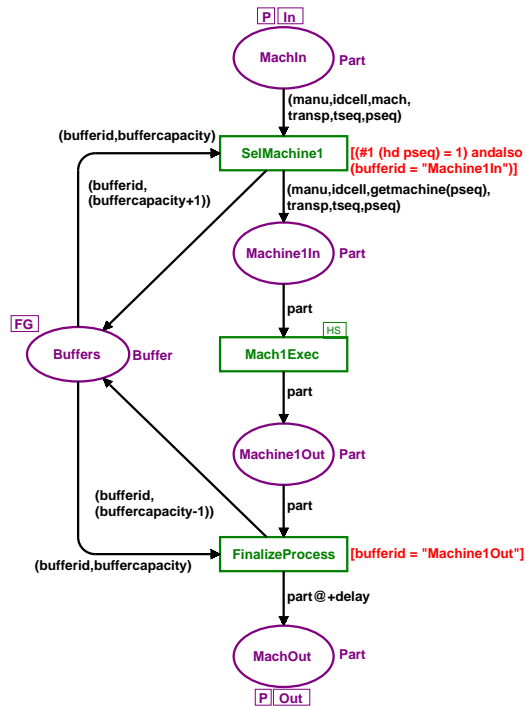


Figura 5. Página de Abstração das Máquinas após a Recuperação e Integração

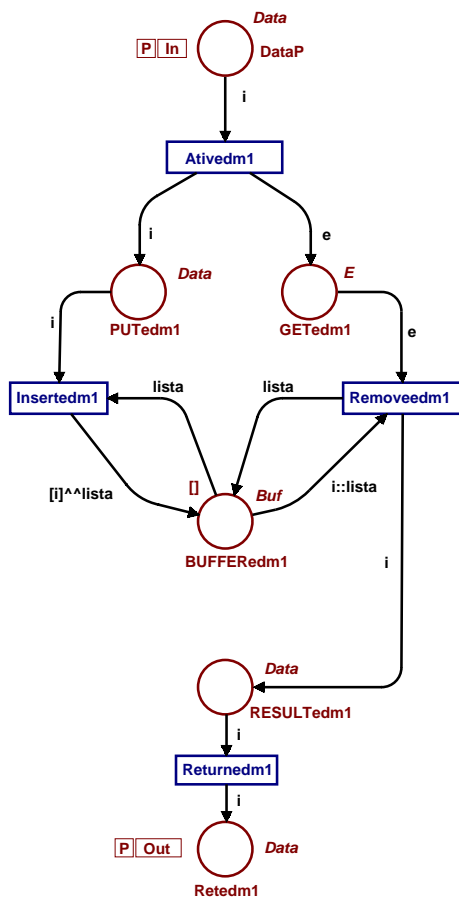


Figura 6. Página da Pilha após a Recuperação e Integração

supervisor, conforme especificado em (Gorgônio & Perkusich, 2000). Atualmente, a integração é feita de forma manual, através da inclusão das definições de cores dos modelos recuperados no nó de declaração global do modelo do arcabouço. Além disso, são definidas transições de substituição no segundo nível da hierarquia do arcabouço e seus respectivos socket e port. Estamos investigando, atualmente, técnicas de integração automática de modelos, tornando o procedimento de modelagem o mais automatizado possível, onde a seqüência de modelagem sistemática definida nesse trabalho é seguida sem a intervenção do projetista.

## Referências

- Christensen, S. & Mortensen, K. H. (1996), *Design/CPN ASK-CTL Manual*, 0.9 edn, University of Aarhus.
- Clarke, E., Grumberg, O. & Peled, D. A. (1999), *Model Checking*, The MIT Press.
- de Carvalho Barros, T. (2000), Supervisão de Sistemas de Produção Baseada em Redes de Petri, Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba.
- Desrochers, A. A. & Al-Jaar, R. Y. (1994), *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems : Modeling, Control, and Performance Analysis*, IEEE Press, New York.
- Dicesare, F., Harhalakis, G., Proth, J., Silva, M. & Vernadat, F., eds (1993), *Practice of Petri Nets in Manufacturing*, Kluwer Academic Pub., London.
- Emerson, E. A. (1990), Temporal and modal logic, in Jan Van Leeuwen, ed., 'Handbook of Theoretical Computer Science', Vol. B: Formal Models And Semantics, Elsevier Science, chapter 16, pp. 995–1072.
- Gorgônio, K. C. & Perkusich, A. (2000), Síntese de especificações em redes de petri para componentes de software, in 'III Workshop de Métodos Formais', João Pessoa, PB - Brasil, pp. 139 – 144.
- Jensen, K. (1992), *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis, Methods and Practical Use*, EACTS – Monographs on Theoretical Computer Science, Springer-Verlag.
- Jensen, K. (1997), *Coloured petri nets-Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, Vol. 2, Springer-Verlag.
- Lemos, A. & Perkusich, A. (2001), Reuse of coloured petri nets software models, in 'Proc. of The Eighth International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, SEKE'01', Buenos Aires, Argentina, pp. 145–152.
- Manoel Silva, Enrique Teruel, R. V. & Pingaud, H. (1998), Petri nets and productions systems, in W. Reisig & G. Rozenberg, eds, 'Lectures on Petri Nets II: Applications', Vol. 2, Springer Verlag, chapter IV, pp. 85–124.
- Murata, T. (1989), 'Petri nets: Properties, analysis and applications', *Proc. of the IEEE* 77(4), 541–580.
- Proth, J.-M. & Xie, X. (1997), *Petri Nets : A Tool for Design and Management of Manufacturing Systems*, John Wiley & Sons, New York.
- Zhou, M. & Dicesare, F. (1993), *Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*, The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, Kluwer Academic Pub., New York.
- Zhou, M. & Venkatesh, K. (1999), *Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems: A Petri Net Approach*, World Scientific, Singapore.
- Zhou, M., ed. (1997), *Petri Nets in Flexible and Agile Automation*, Kluwer Academic Pub., New York.