

# MODELAGEM E ANÁLISE DE UMA LINHA DE DECAPAGEM ATRAVÉS DE REDE DE PETRI

Marília Gabriela Viana Nassar<sup>1</sup>

José Isidro Garcia<sup>2</sup>

Paulo Eigi Miyagi<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho introduz uma metodologia para a modelagem do Sistema de Entrada de Material (SEM) de uma linha de decapagem. O modelo gerado além de ser fundamental para a análise estrutural e funcional do sistema é também efetivo para especificar as estratégias de controle. O SEM é aqui visto como um sistema a eventos discretos (SED) onde, técnicas derivadas da rede de Petri podem ser utilizadas para sua descrição. Tais técnicas incluem interpretações práticas como o *production flow schema* e o *mark flow graph* (PFS/MFG), que têm provado grande eficiência na modelagem hierárquica, análise e controle de SED. Neste contexto, o SEM é modelado em diferentes níveis de abstração: a) no nível conceitual com a aplicação do PFS; e b) no nível funcional com a aplicação do MFG. A metodologia proposta confirma a eficácia do procedimento de modelagem para derivação da especificação funcional do sistema envolvendo tanto o objeto de controle como o sistema de controle, e das estratégias que facilitam sua integração com outros sistemas.

**Palavras-chave:** Redes de Petri; Sistemas; Simulação.

## MODELYNG AND ANALSYNG OF A PICKLYNG LINE USING PETRI NET

### Abstract

This work introduces a methodology to model a Material Entry System (MES) in a pickling line. The generated model is fundamental for structural and functional analysis of the system, and it is effective to specify the control strategies. The MES is approached as a discrete event system (DES) where, techniques derived from Petri net can be used for its description. These techniques include practical interpretations such as PFS (production flow schema) and MFG (mark flow graph), that had been confirmed they efficiency in hierarchical modeling, analysis and control of DES. In this context, the MES is modeled in different levels of abstraction: a) at conceptual level through the application of PFS; and b) at functional level through the application of MFG. The proposed methodology confirm that the modeling procedure is effective for derivation of the functional specification of the system, which includes control object and control system, and the strategies for its integration with others system.

**Key words:** Petri net; Systems; Simulation.

## I INTRODUÇÃO

As demandas do mundo atual fazem da eficiência, da produtividade e da segurança os principais aspectos que devem ser levados em conta ao projetar ou modificar um sistema. Para melhorar estes aspectos tem-se que, necessariamente, considerar novos conceitos e diferentes técnicas e abordagens que possam ser aplicadas tanto para a modelagem do sistema como para sua avaliação. No caso da indústria siderúrgica, o atendimento aos requisitos de maior exigência dos produtos gerados (como

por exemplo: menores espessuras da chapa, aumento do nível de qualidade, menores custos de produção etc.) e a crescente competitividade do mercado têm motivado a necessidade de melhorar continuamente o processo de laminação assegurando e incrementando a confiabilidade na produção. Como resultado tem-se sistemas com grande número de elementos com diferentes e complexas relações de interação sendo necessário o uso de novas estratégias de controle.

<sup>1</sup>Engenheira Mecânica, Mestranda em Eng. Mecatrônica pela Escola Politécnica da USP, Laboratório de Sistemas de Automação, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, CEP 05508-030. São Paulo, SP, Brasil. marilia@cosipa.com.br

<sup>2</sup>Doutorando em Eng. Mecatrônica pela Escola Politécnica da USP, Laboratório de Sistemas de Automação, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, CEP 05508-030. São Paulo, SP, Brasil. Josgarme@univalle.edu.co

<sup>3</sup>Professor Titular da Escola Politécnica da USP, Laboratório de Sistemas de Automação, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, CEP 05508-030. São Paulo, SP, Brasil. pemiyagi@usp.br

Um dos principais subsistemas que compõem o processo de decapagem nas linhas de laminação é o sistema de entrada de material (SEM). Os principais objetivos do SEM são:

- retirar as imperfeições oriundas de processos anteriores no início e fim das tiras que são recebidas na forma de bobinas; e
- através do processo de soldagem, assegurar a continuidade e produtividade do fluxo de produção através da união das tiras.

Assim, a eficiência do funcionamento do SEM deve ser objeto de cuidadosa análise em função de sua influência na produtividade da laminação como um todo, garantia de continuidade no fluxo produtivo do produto e segurança pessoal. Além disso, torna-se fundamental uma modelagem adequada que permita verificar a dinâmica do sistema e sua integração com outros sistemas e, levantar informações para o aprimoramento do desempenho global.

Um modelo é uma representação, freqüentemente em termos matemáticos, das características que são consideradas importantes do objeto ou sistema em estudo. Qualquer sistema pode ser modelado para que se estude a melhor condição de operação e se identifiquem erros de projeto antes que o sistema seja efetivamente implantado.<sup>(1)</sup>

Baseado nos aspectos citados acima e considerando que o SEM tem como característica um comportamento dinâmico definido através de mudanças (evolução) de estados como consequência da ocorrência de eventos discretos, este trabalho considera aplicação da teoria de rede de Petri (como técnica de modelagem, análise, controle e projeto de sistema a eventos discretos - SED).<sup>(2)</sup>

A rede de Petri e técnicas derivadas, como é o caso do MFG (*mark flow graph*), têm sido introduzidas com sucesso como ferramentas eficientes para aplicações em sistemas de manufatura. Entretanto, dependendo da complexidade dos sistemas, os modelos

gerados podem tornar-se muito difíceis de serem compreendidos e tratados. Para resolver este problema, foi introduzida a metodologia PFS/MFG, para o desenvolvimento de modelos em MFG a partir de um modelo conceitual hierarquizado construído em PFS (*production flow schema*). Tendo em conta estes aspectos e, sendo esta metodologia um meio disciplinador para a construção de modelos em diferentes níveis, considera-se conveniente a sua utilização no caso do SEM.

## 2 SISTEMA DE DECAPAGEM

A decapagem (Figura 1) tem como principal finalidade remover a camada de óxido (carepa) formada na superfície da tira no processo de laminação de tiras a quente (LTQ). Essa remoção é feita através da imersão da chapa em tanques com ácido clorídrico (HCl), em velocidade controlada. Na saída, o material é oleado, para proteger a superfície. A borda do material poderá ou não ser aparada para ajuste da largura em função da largura solicitada pelo cliente e do acabamento especificado. A solução usada para remoção do óxido é recuperada nas unidades de regeneração de HCl e devolvida para linha para, novamente, executar seu papel de remoção dos óxidos de novas bobinas. O produto do processo de decapagem são bobinas que têm três possíveis aplicações: linha a frio (LTF), linha a quente (LA/TQ) ou simplesmente para um estoque de BQDs (bobinas quentes decapadas).

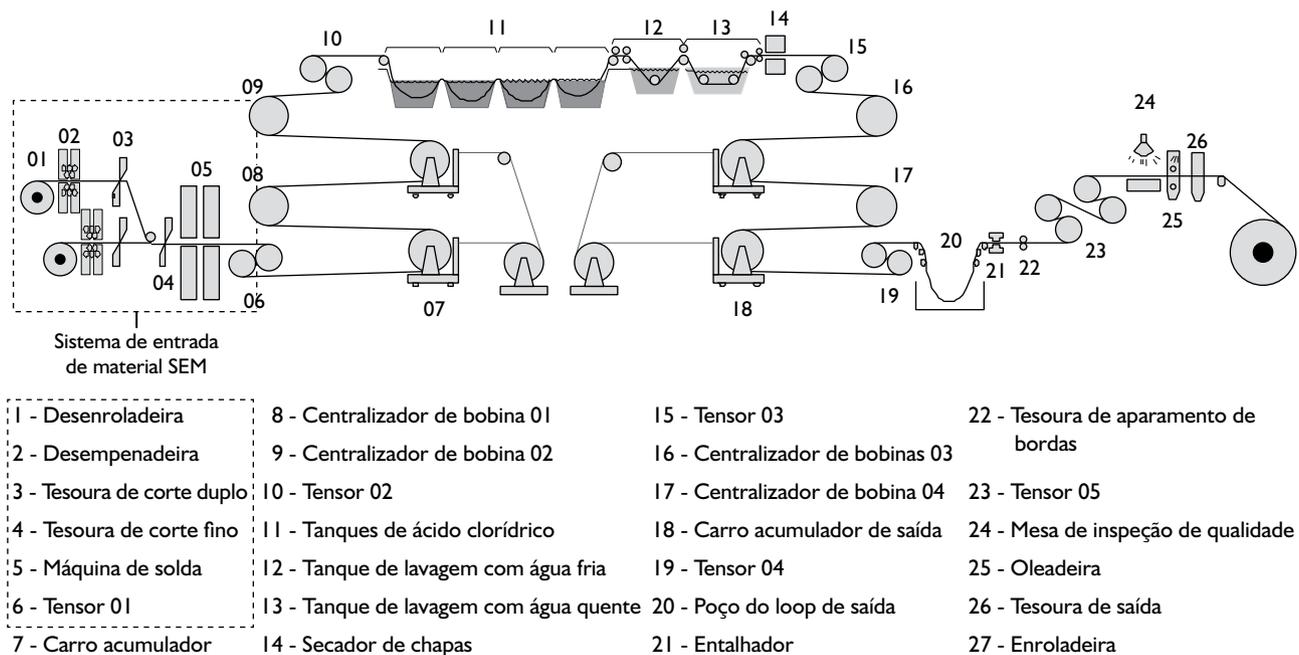


Figura 1. Layout de um processo de decapagem com 2 desenroladeiras no SEM.<sup>(3)</sup>

O SEM (quadro em destaque na Figura 1) possui como característica um comportamento dinâmico definido através da mudança de estados discretos definida pela ocorrência de eventos vistos como instantâneos. Por exemplo, entre os eventos que podem ocorrer estão: ativação e desativação de sensores de presença, acionamento e desligamento de motores, abertura e fechamento de cilindros, ativação e desativação de comandos manuais, etc, caracterizando assim o SEM como um SED.

### 3 REDE DE PETRI E SUAS EXTENSÕES PARA SEM

Desde sua apresentação, em 1962, por Carl A. Petri, a rede de Petri (RP) tem sido considerada como uma poderosa ferramenta para modelagem, análise e projeto de SED. Esta ferramenta permite fazer uma descrição gráfica e matemática (formal) do sistema tratado. Neste sentido, a RP facilita a comunicação entre as pessoas relacionadas com o projeto, permitindo uma fácil interpretação, identificação clara dos estados e ações do sistema.

A RP é uma ferramenta gráfico-matemática para a modelagem de SED. Esta ferramenta além da visualização explícita dos elementos e entidades que compõem o modelo permite a verificação e validação dos requisitos do sistema. Assim, a sua parte estrutural pode ser considerada como uma ferramenta de projeto, similar ao fluxograma e diagramas de blocos. Entretanto, possui ainda o conceito de marcas e regras de evolução destas, as quais são utilizadas para representar a dinâmica do sistema. Como uma ferramenta matemática, a RP pode ser também descrita através de matrizes, e sua dinâmica especificada por equações de estado, e outras relações,<sup>(2)</sup> o que permite fazer a verificação das propriedades relacionadas ao comportamento do sistema como relações entre eventos, operações concorrentes, sincronismo, conflito, seqüência, entre outras.

Uma RP é formalmente definida como um grafo bipartido direcionado e com um estado inicial denominado marcação inicial,  $m_0$ , que é composto pelos seguintes elementos:

- Lugar, representado por círculo 
- Transição, representada por barra 
- Arcos, representado por seta 
- Marca, representada por ponto 

Os arcos são orientados tanto de lugares para transições, como de transições para lugares. Uma variável  $m$  designa a um lugar  $p$  um número inteiro positivo que representa o número de marcas que devem ser desenhadas no interior do lugar. No modelo em RP, tomando em consideração o conceito de condições e eventos,<sup>(4)</sup> um lugar representa uma condição e uma transição representa um evento. Assim, para um evento acontecer, todas as pré-condições do evento tem que ser satisfeitas. Quando um evento ocorre, as suas pré-condições deixam de ficar satisfeitas, e as suas pós-condições (previamente não satisfeitas) passam a estar satisfeitas.

Assim, a RP oferece a possibilidade de representar a dinâmica do sistema e a sua estrutura em vários níveis de detalhamento. O suporte matemático oferecido por ela facilita a realização de testes formais de propriedades do sistema. A formalidade é especialmente útil nas aplicações onde a segurança é um fator relevante como o caso de SEM. Uma definição formal, regras de execução e formalização das propriedades de dinâmicas da RP, são apresentados em Peterson<sup>(1)</sup> e Mutata.<sup>(2)</sup> Deve-se ter uma especial atenção na análise das propriedades de: a) vivacidade, isto é, uma RP é dita viva se e somente se ela tem sempre alguma transição (evento) habilitada a partir de algum estado conseqüente; b) segurança, isto é, uma RP é segura se é possível garantir que o número de marcas nos lugares nunca ultrapassa um certo valor finito; e c) reversibilidade, isto é, qualquer que seja o estado atingido pela RP ele sempre poderá retornar ao estado inicial. Estas propriedades são estudadas no modelo a fim de verificar a ocorrência de casos como deadlocks (auto-travamentos), *overflow* de material e estados anormais no sistema.

Neste trabalho, considera-se o PFS e o MFG<sup>(4)</sup> para modelar o SEM que são interpretações da RP próprias para aplicação em diversos níveis de modelagem, análise e controle de SED. Estas técnicas permitem a modelagem de modelagem de sistemas seguindo um procedimento sistemático e racional baseado na interpretação hierárquica da estrutura e funções do sistema. Inicialmente o modelo conceitual do sistema (representando um alto nível de abstração do sistema sem detalhamento de sua dinâmica) é desenvolvido através de PFS (Figura 2). Nesta etapa o propósito é modelar as principais características das funções que serão consideradas no sistema.

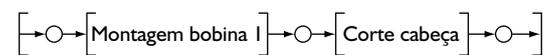


Figura 2. PFS de um sistema.<sup>(3)</sup>

Para a modelagem do comportamento dinâmico do sistema, o modelo em PFS é convertido progressivamente em um modelo em MFG (Figura 3), isto é, uma descrição detalhada do funcionamento dinâmico das diversas partes do sistema.

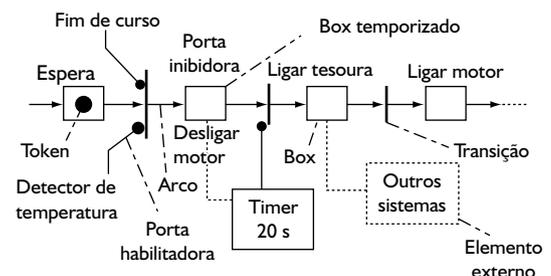


Figura 3. Elementos estruturais do MFG.<sup>(3)</sup>

## 4 MODELAGEM

Considerando que a caracterização das melhores condições de operação de um sistema assim como a identificação de erros de projeto devem ser efetuados antes que o sistema seja efetivamente implantado é fundamental que as soluções concebidas sejam previamente e devidamente avaliadas. É neste contexto que a construção e o estudo de modelos tem papel fundamental<sup>(1)</sup> de modo que a seguir é apresentado o procedimento proposto de modelagem de um sistema de entrada de material (SEM).

### 4.1 Procedimento de Modelagem de Sistema de Entrada de Material (SEM)

O procedimento é composto de cinco etapas as quais são detalhadas a seguir.

#### 4.1.1 Etapa 1: Coleta de informações sobre o objetivo do SEM

Esta etapa é desenvolvida revisando a documentação disponibilizada do processo; coletando dados de fontes como a Internet, conhecendo o processo em campo; conferindo informações com os responsáveis pelo projeto, operação e manutenção do sistema. Nesta etapa são levantados todos os desenhos dos equipamentos, manuais de operação e manutenção.

#### 4.1.2 Etapa 2: Definição do sistema a ser modelado

A fim de atender as especificações das principais atividades a serem realizadas pelo SEM, os requisitos temporais devem ser levantados. Por exemplo, no caso específico do SEM considerado neste trabalho tem-se os dados da Tabela 1.

**Tabela 1.** Requisitos temporais para o seqüenciamento entre pré-soldagem e soldagem.

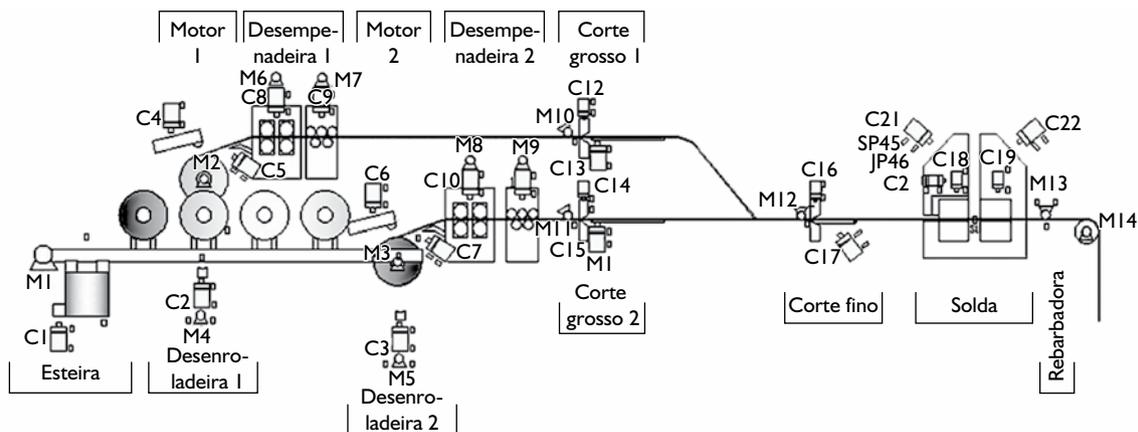
Atividades	Tempo máximo (s)
Corte de cabeça (da tira)	20
Corte de cauda (da tira)	20
Ajuste da máquina de solda no processo de solda	60
Solda por fusão	27
Retirada de rebarba	10

#### 4.1.3 Etapa 3: Modelagem estrutural do sistema

Nesta etapa identificam-se todos os componentes do sistema, classificando-os em dois tipos, segundo pertençam ao sistema de controle ou ao objeto de controle. O objeto de controle envolve o processo produtivo, máquinas, mecanismos e equipamentos envolvidos nas atividades de corte de cabeça, corte de cauda, preparação da máquina do processo de solda, solda por fusão, retirada de rebarba. O sistema de controle envolve os dispositivos de realização de controle (controladores) e os dispositivos de atuação (acionadores) e detecção (sensores) como os apresentados na Figura 4.

#### 4.1.4 Etapa 4: Modelagem Conceitual e Funcional do Sistema

Os modelos nos níveis conceitual e funcional do SEM são então desenvolvidos de acordo com as informações e a definição do sistema, conforme levantamento das etapas ante-



Classificação	Dispositivos
Comandos manuais	Estação manual de controle manual, CM
Sensores diretos	1 Sensor de temperatura (T), 50 Sensores de presença (SP)
Dispositivos de atuação	14 Motores (M), 22 Cilindros hidráulicos (C), Transformador (S)
Dispositivos de monitoração	10 Dispositivos luminosos de alarme (A), 5 audiovisuais de alarme (AA)
Dispositivos de controle	2 CLP, 3 Interface homem-máquina (HMI)

**Figura 4.** Componentes do SEM.<sup>(3)</sup>

riores e baseados na estrutura do sistema. Assim a modelagem conceitual considera cada um dos elementos estruturais do sistema em uma abordagem top-down, ou seja, partindo das características gerais do sistema ou “macro”, detalhando-as, depois, passo a passo. Esta modelagem é realizada usando o PFS e o MFG e suas extensões. A Figura 5 apresenta o modelo de funcionamento desenvolvido em PFS do SEM considerado neste trabalho.

A Figura 5 apresenta ainda um refinamento do modelo SEM da atividade [Preparação cabeça] desenvolvido com o MFG. Este MFG especifica o comportamento dinâmico da atividade descrita no modelo PFS visando o atendimento dos requisitos funcionais e temporais do sistema. Tem-se uma descrição do comportamento dinâmico da atividade [Montagem transportadora] com o detalhamento do processo de montagem da bobina na esteira transportadora.

#### 4.1.5 Etapa 5: análise dos modelos

Depois de construir o modelo do SEM, este deve ser validado e verificado. No presente caso, o software HPSim<sup>(5)</sup> foi usado para analisar por simulação os modelos resultantes.

Os resultados obtidos a partir das simulações são fundamentais para confirmar se o sistema apresenta o comportamento esperado diante da ocorrência de condições pré-determinadas, por exemplo, tesoura a fino cortando cabeça da bobina a ser soldada.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho introduz um procedimento para a modelagem de SEM através de uma abordagem de sistemas a eventos discretos e especificamente mediante a utilização de redes de Petri interpretadas. Este procedimento permite o desenvolvimento estruturado de modelos, facilitando o processo de modelagem e o aprimoramento da especificação de controle do SEM visando uma posterior implementação do sistema de controle e do programa de controladores programáveis.

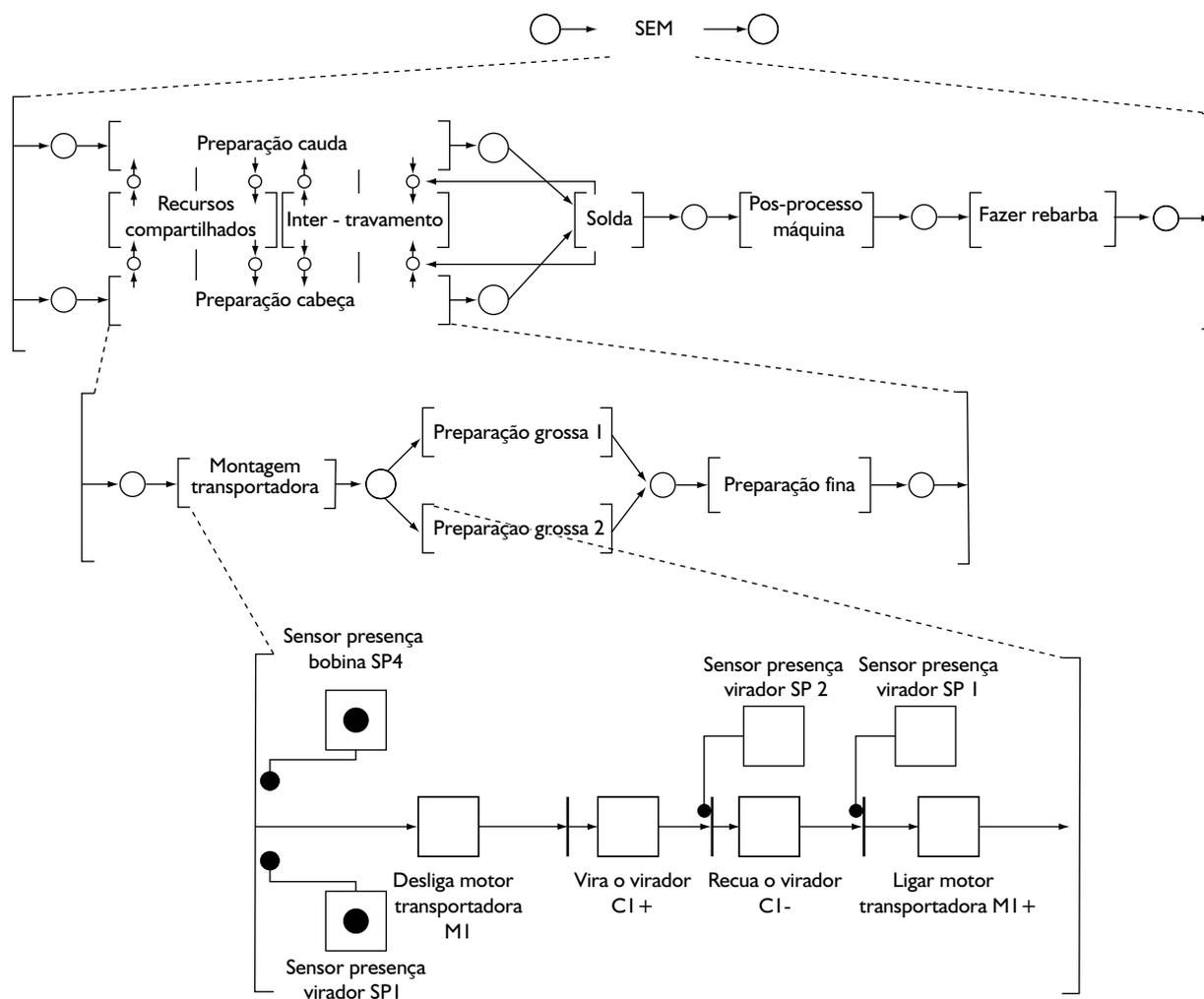


Figura 5. Modelagem conceitual e funcional do SEM. <sup>(3)</sup>

O estudo realizado confirma que o procedimento proposto no presente trabalho apresenta as seguintes características: a) é uma forma sistemática para a abordagem de SEM e para a construção de seus modelos, os quais podem ser usados para a verificação e validação da estratégia de controle do SEM, e sua implementação; b) identifica as características e operações do sistema de

modo claro e uniforme; e c) descreve o sistema do nível conceitual ao detalhado de acordo com a estrutura hierárquica das atividades do sistema, considerando aspectos de modularidade, flexibilidade e capacidade de expansão.

## REFERÊNCIAS

- 1 PETERSON, J.L. **Petri net theory and the modeling of systems**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1981.
- 2 MUTATA, T. Petri Nets: Properties, analysis and application. **Proceedings of the IEEE**, v. 77, n. 4, p. 541-80, apr. 1989.
- 3 NASSAR, M.G.V. **Modelagem de um sistema supervisório aplicado a um sistema de automação balanceada**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica em Andamento) - Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- 4 MIYAGI P.E. **Controle programável - fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1996.
- 5 ANSCHUETZ, H. HPSim. Disponível em: <http://www.winpesim.de> Acesso em: 25 jul 2008.

Recebido em: 09/05/08

Aceito em: 15/07/08

Proveniente de: SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS, I I., 2007, Porto Alegre, RS. São Paulo: ABM, 2007.