

JOSÉ MAURÍCIO ORSOLINI FILHO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA LÓGICA DE CONTROLE DE  
UMA ESTAÇÃO DE MONTAGEM ROBOTIZADA**

Monografia apresentada a Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para a Conclusão de Curso.

São Paulo

2010

JOSÉ MAURÍCIO ORSOLINI FILHO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA LÓGICA DE CONTROLE DE  
UMA ESTAÇÃO DE MONTAGEM ROBOTIZADA**

Monografia apresentada a Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para a Conclusão de Curso.

Curso de Graduação: Engenharia  
Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Fabrício  
Junqueira

São Paulo

2010

Aos meus pais José Maurício Orsolini e Maria Thelma de Oliveira Pereira e Orsolini, e aos meus irmãos, Caio Eduardo de Pereira Orsolini e Heloísa Maria de Pereira Orsolini Albertotti.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA  
ENGENHARIA MECÂNICA/NAVAL DA ESCOLA POLITÉCNICA (EPMN) –  
USP.

Orsolini Filho, José Maurício  
Modelagem e Simulação da Lógica de Controle de  
uma Estação de Montagem Robotizada / M.M.L.  
Orsolini Filho. -- São Paulo, 2010.  
59 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo. Departamento de  
Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Modelagem 2. Simulação 3. Sistemas Discretos  
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos II. t.

## ***Agradecimentos***

Aos meus pais, José Maurício Orsolini e Maria Thelma de Oliveira Pereira e Orsolini, e aos meus irmãos Caio Eduardo de Pereira Orsolini e Heloísa Maria de Pereira Orsolini Albertotti, por me dar todo o suporte e incentivo necessário durante os anos de faculdade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabrício Junqueira pela sua constante orientação e incentivo para o desenvolvimento deste trabalho. Aos colegas Matheus Munhoz Lages Marchenta e José Isidro Garcia Melo, pelo apoio durante o desenvolvimento deste projeto.

À Escola Politécnica da USP, em especial ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, que institucionalmente viabilizaram este trabalho.

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO .....	2
1.2. ESTRUTURA.....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1. REDE DE PETRI.....	4
2.2. PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS) .....	5
2.3 CONTROLE SUPERVISÓRIO DE SED .....	7
2.4 METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE .....	8
2.4.1 <i>Análise de necessidades</i> .....	10
2.4.2 <i>Definição das necessidades</i> .....	10
2.4.3 <i>Projeto do sistema de controle</i> .....	11
<b>3. CÉLULA DE MANUFATURA DIDÁTICA.....</b>	<b>12</b>
3.1. ESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO .....	12
3.2. ESTAÇÃO DE INSPEÇÃO OU DE TESTES.....	13
3.3. ESTAÇÃO DE TRANSPORTE.....	14
3.4. ESTAÇÃO DE MONTAGEM .....	15
<b>4. PROJETO.....</b>	<b>21</b>
4.1 IDENTIFICAÇÃO DO OBJETIVO FINAL DO SISTEMA:.....	21
4.2 COMPREENSÃO DO OBJETO DE CONTROLE, INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS: ..	21
4.3 ORGANIZAÇÃO DOS CONHECIMENTOS SOBRE O SISTEMA DE CONTROLE (DISPOSITIVO DE CONTROLE, EQUIPAMENTOS PERIFÉRICOS, ETC.):.....	23
4.4 ABSTRAÇÃO E ANÁLISE DAS FUNÇÕES DE CONTROLE, COMO OS MODOS DE OPERAÇÃO E MONITORAÇÃO DAS INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS: .....	24
4.5 DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE: .....	24
4.6 DEFINIÇÃO DO FLUXO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE: .....	25
4.7 DIVISÃO DAS FUNÇÕES E DEFINIÇÃO DAS INTERFACES .....	26

4.8 DEFINIÇÃO E ALOCAÇÃO DOS SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA .....	36
4.9 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DO PROGRAMA DE CONTROLE .....	45
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 1. ESQUEMA ILUSTRATIVO DA CÉLULA DE MANUFATURA DIDÁTICA (MINI CIM) .....	2
FIGURA 2. ELEMENTOS DE REDE DE PETRI.....	4
FIGURA 3. INTERAÇÃO ENTRE ELEMENTOS ATIVOS E PASSIVOS .....	5
FIGURA 4. ESTRUTURA GROSSEIRA DE UM SISTEMA PRODUTIVO (MIYAGI, 1996).....	6
FIGURA 5. ATIVIDADE NO PFS (MIYAGI, 1996) .....	7
FIGURA 6. SED EM MALHA FECHADA (RIBEIRO CURY, 2001) .....	7
FIGURA 7. CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA DE CONTROLE (MIYAGI, 1996) .....	8
FIGURA 8. MONTAGEM DAS DIFERENTES PEÇAS PELO MINI CIM.....	12
FIGURA 9. ESQUEMA ILUSTRATIVO DA MINI CÉLULA DE MANUFATURA DIDÁTICA (MINI CIM) .....	13
FIGURA 10. ESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO E TESTES .....	14
FIGURA 11. DETALHAMENTO DOS COMPONENTES DA ESTAÇÃO DE TRANSPORTE .....	15
FIGURA 12. DETALHAMENTO DOS COMPONENTES DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM .....	15
FIGURA 13. MAGAZINE DE PINOS DE SUPORTE .....	16
FIGURA 14. MAGAZINE DE MOLAS .....	17
FIGURA 15. MAGAZINE DE TAMPAS .....	17
FIGURA 16. MÓDULO DE TRAVAMENTO .....	17
FIGURA 17. (A) - ACIONAMENTO DO EIXO Y; (B) - ACIONAMENTO DO EIXO X.....	18
FIGURA 18. CLP E MÓDULO DE CONTROLE DOS MOTORES (DESTAQUE).....	18
FIGURA 19. EIXO Z (GUIA Z), SENSORES DE POSIÇÃO E GARRA DEDICADA.....	19
FIGURA 20. DETALHES DA GARRA DEDICADA.....	20
FIGURA 21. MAGAZINES, APOIO DE PALETE E MÓDULO DE TRAVAMENTO .....	20
FIGURA 22. MODELAGEM EM PFS – NÍVEL MAIS BAIXO DE DETALHAMENTO .....	26
FIGURA 23. DISPONIBILIZAÇÃO DE MOLAS .....	27
FIGURA 24. DISPONIBILIZAÇÃO DE TAMPAS .....	28
FIGURA 25. DISPONIBILIZAÇÃO DE PINO .....	28
FIGURA 26. RETIRADA DO PALETE .....	29
FIGURA 27. POSICIONAMENTO DO PALETE NO APOIO DE PALETE .....	29
FIGURA 28. RETIRADA DA PEÇA CORPO DO PALETE .....	30
FIGURA 29. POSICIONAMENTO DA PEÇA CORPO NO MÓDULO DE TRAVAMENTO .....	30
FIGURA 30. RETIRADA DE PINO NO MAGAZINE DE PINOS.....	31
FIGURA 31. POSICIONAMENTO DO PINO NA PEÇA CORPO .....	31
FIGURA 32. RETIRADA DE MOLA DO MAGAZINE DE MOLAS .....	32
FIGURA 33. POSICIONAMENTO DA MOLA NA PEÇA CORPO.....	32
FIGURA 34. RETIRADA DA TAMPA DO MAGAZINE DE TAMPAS .....	32
FIGURA 35. POSICIONAMENTO DA TAMPA NA PEÇA CORPO .....	33
FIGURA 36. FIXAÇÃO DA TAMPA NA PEÇA CORPO.....	33
FIGURA 37. ABERTURA DO MÓDULO DE TRAVAMENTO.....	34
FIGURA 38. RETIRADA DA PEÇA DO MÓDULO DE TRAVAMENTO .....	34
FIGURA 39. POSICIONAMENTO DA PEÇA NO PALETE .....	35
FIGURA 40. RETIRADA DO PALETE DO APOIO DE PALETE .....	35
FIGURA 41. POSICIONAMENTO DO PALETE NO CARRO TRANSPORTADOR E FINAL DA MONTAGEM .....	35
FIGURA 42. MODELO EM RdP PARA RECUO DO CILINDRO DO MAGAZINE DE MOLAS .....	36
FIGURA 43. MODELO EM RdP PARA AVANÇO DO PISTÃO DO MAGAZINE DE TAMPAS.....	37
FIGURA 44. MODELO EM RdP PARA AVANÇO DO PISTÃO DO MAGAZINE DE TAMPAS .....	37
FIGURA 45. MODELO EM RdP PARA RECUO DO PISTÃO DO MAGAZINE DE TAMPAS .....	38
FIGURA 46. MODELO EM RdP PARA GIRO DO ENCAIXE DE PINO NO SENTIDO HORÁRIO.....	38
FIGURA 47. MODELO EM RdP PARA GIRO DO ENCAIXE DE PINO NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO .....	39
FIGURA 48. MODELO EM RdP PARA POSICIONAMENTO DA GUIA EM X .....	40
FIGURA 49. MODELO EM RdP PARA POSICIONAMENTO DA GUIA EM Y .....	40
FIGURA 50. MODELO EM RdP PARA SUBIDA DA GARRA DEDICADA PELA GUIA Z.....	41
FIGURA 51. MODELO EM RdP PARA DESCIDA DA GARRA DEDICADA PELA GUIA Z .....	41
FIGURA 52. ABERTURA DA GARRA DEDICADA .....	42
FIGURA 53. FECHAMENTO DA GARRA DEDICADA.....	42
FIGURA 54. GIRO DA GARRA DEDICADA DE 270º NO SENTIDO HORÁRIO.....	43
FIGURA 55. GIRO DA GARRA DEDICADA DE 270º NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO .....	43



FIGURA 56. ABERTURA DO MÓDULO DE TRAVAMENTO.....	44
FIGURA 57. FECHAMENTO DO MÓDULO DE TRAVAMENTO .....	44
FIGURA 58. MODELO EM RDP DA LÓGICA DE CONTROLE DA ESTAÇÃO DE MONTAGEM DO MINI CIM (SOFTWARE: HPSIM) .....	45
FIGURA 59. LUGARES E TRANSIÇÕES QUE INDICAM REUTILIZAÇÃO DE ALGUMAS FUNÇÕES DE CONTROLE NO MODELO .....	46
FIGURA 60. LUGARES E TRANSIÇÕES QUE INDICAM REUTILIZAÇÃO DE ALGUMAS FUNÇÕES DE CONTROLE NO MODELO (2).....	47

## Lista de Tabelas

TABELA 1. LISTA DE SENSORES E ATUADORES .....	23
TABELA 2. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE RECUO DO PISTÃO DO MAGAZINE DE MOLAS .....	36
TABELA 3. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE AVANÇO DO PISTÃO DO MAGAZINE DE MOLAS .....	37
TABELA 4. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE AVANÇO DO PISTÃO DO MAGAZINE DE TAMPAS .....	37
TABELA 5. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE RECUO DO PISTÃO DO MAGAZINE DE TAMPAS .....	38
TABELA 6. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE GIRO DO ENCAIXE DE PINO NO SENTIDO HORÁRIO .....	39
TABELA 7. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE GIRO DO ENCAIXE DE PINO NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO .....	39
TABELA 8. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE MOVIMENTAÇÃO DA GARRA DEDICADA ATRAVÉS DO EIXO X.....	40
TABELA 9. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE MOVIMENTAÇÃO DA GARRA DEDICADA ATRAVÉS DO EIXO Y.....	40
TABELA 10. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE SUBIDA DA GARRA DEDICADA DA GUIA Z .....	41
TABELA 11. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE DESCIDA DA GARRA DEDICADA DA GUIA Z .....	41
TABELA 12. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE ABERTURA DA GARRA DEDICADA.....	42
TABELA 13. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE FECHAMENTO DA GARRA DEDICADA.....	42
TABELA 14. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE GIRO DA GARRA DEDICADA NO SENTIDO HORÁRIO .....	43
TABELA 15. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE GIRO DA GARRA DEDICADA NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO.....	43
TABELA 16. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE ABERTURA DO MÓDULO DE TRAVAMENTO .....	44
TABELA 17. DETALHAMENTO DOS LUGARES E TRANSIÇÕES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE FECHAMENTO DO MÓDULO DE TRAVAMENTO.....	44

## **Lista de Abreviaturas**

RdP – Rede de Petri

SED - Sistema a Eventos Discretos

TI - Tecnologia da Informação

## Resumo

Sistemas automatizados são implementados e constantemente atualizados, seja no contexto industrial, comercial ou residencial, por resultarem em vantagens técnicas e/ou produtivas. Tais sistemas são considerados sistemas complexos por poderem ter elementos de diferentes naturezas (mecânica, eletroeletrônica e computacional) interagindo entre si. De forma a lidar com esta complexidade e reduzir a possibilidade de ocorrência de erros em sua implementação e manutenção, utiliza-se métodos ou sistemáticas de projeto. Para o projeto da lógica de controle da estação de montagem da célula de manufatura didática (Mini CIM) presente no Laboratório de Sistemas de Automação, além do método de projeto, pode-se utilizar ferramentas de modelagem e simulação. Desta forma a lógica pode ser analisada e validada antes de ser codificada e transferida para o controlador. Neste sentido, o presente trabalho aborda o projeto do sistema de controle de uma estação de montagem robotizada. Para tanto, é utilizada a metodologia de projeto proposta em Miyagi (1996) e as ferramentas PFS (*Production Flow Schema*) e RdP (Rede de Petri) na modelagem e análise da lógica de controle proposta.

## **Abstract**

Automated Systems are implemented and constantly upgraded, whether in the industrial, commercial or residential context, as they result in technical and/or productive advantages. Such systems are considered complex for having elements from different natures (mechanical, electro/electronic and computational) interacting among themselves. In order to deal with this complexity and reduce the possibility of errors occurring in its implementation and maintenance, project methods or systematics are used. For the Control Logic's Project of the Assembly Station of the Didactic Manufacture Cell, standing on the Automation Systems Laboratory, besides the Project's Methodology, it is possible to utilize Modeling and Simulation Tools. In this way, the logic can be analyzed and validated before it is codified and transferred to the controller. Having this purpose, this given project approaches the Control System's project of an Automated Assembly Station. For this purpose, the Project's Methodology proposed in Miyagi (1996), the PFS (Production Flow Schema) and Petri net tools are applied in the Analysis and Modeling of the proposed Control's Logic.

## 1. Introdução

A revolução industrial implicou em mudanças profundas e permanentes para a sociedade como um todo. Ela marcou o princípio da grande transição da sociedade agrícola para a sociedade urbana, bem como a superação do trabalho manual humano pelo uso das máquinas (SILVA FILHO, 2001).

O momento do final do século XX ao começo do século XXI é caracterizado como o período posterior à revolução tecnológica, ou a revolução digital. A era da informação, como é contextualizada, tem como ponto central a otimização do tempo despendido por processos sistêmicos padronizados. O processamento e a troca de informações progrediram numa taxa jamais antes vivenciada (SILVA FILHO, 2001).

Nos processos produtivos, o avanço se mostra presente em vários aspectos como melhores materiais, melhores processos produtivos, processos menos suscetíveis a falhas, com produtividade aprimorada e maior flexibilidade. Como exemplo deste avanço tem-se a evolução da tecnologia da informação e sua contribuição para o constante aprimoramento dos processos produtivos no final do século XX, que vem contribuindo de maneira permanente e cada vez mais efetiva nos processos de produção, estreitando fronteiras, conferindo flexibilidade e produtividade a tais processos (JUNQUEIRA, 2006).

A introdução da TI nos processos produtivos também vem permitindo a integração dos diversos sistemas da empresa, em seus diferentes níveis. Como exemplo, pode-se citar os sistemas de supervisão e controle, responsáveis pelas operações do chão de fábrica, típicos em uma instalação de médio e grande porte que são compostos por uma coleção heterogênea de *hardwares* e *softwares* distribuídos em um conjunto de plataformas (estações de operação, unidades remotas, controladores programáveis, etc.) A necessidade de integração de sistemas heterogêneos implica um aumento da complexidade e diversidade dos sistemas (JUNQUEIRA, 2006).

Tais sistemas heterogêneos podem ser descritos como uma sucessão de eventos discretos que geram mudanças de estado, caracterizando um Sistema a Eventos Discretos (SED). De modo geral, um sistema a eventos discretos (SED) é um sistema dinâmico cujas variações de estado são

estritamente condicionadas pela ocorrência de eventos. O conceito de evento é fundamental, caracterizado como algo sem duração e única causa possível para as mudanças de estado (MAIA, *et al.*, 2005).

### 1.1. Objetivo

Dentro deste contexto, o presente trabalho enfoca a necessidade de lidar com a complexidade de tais sistemas, apresentando uma abordagem com modelagem e simulação por Rede de Petri (RdP), utilizando a Metodologia de Projeto de Sistemas de Controle apresentada em MIYAGI (1996) de modo a estudar, projetar e implementar uma solução de modelagem e simulação para Sistemas a Eventos Discretos para o sistema de controle da estação de montagem robotizada da célula de manufatura didática. Ou seja, uma solução de modelagem e simulação para Sistemas a Eventos Discretos, de forma a lidar com a complexidade de tais sistemas e inimizar a ocorrência de erros em sua implementação, ou seja, para análise e validação de sua lógica de controle.

Como unidade industrial será utilizada a estação de montagem da célula de manufatura didática (Mini CIM) presente no Laboratório de Sistemas Automatizados (Figura 1), mais especificamente a estação de montagem desta unidade.

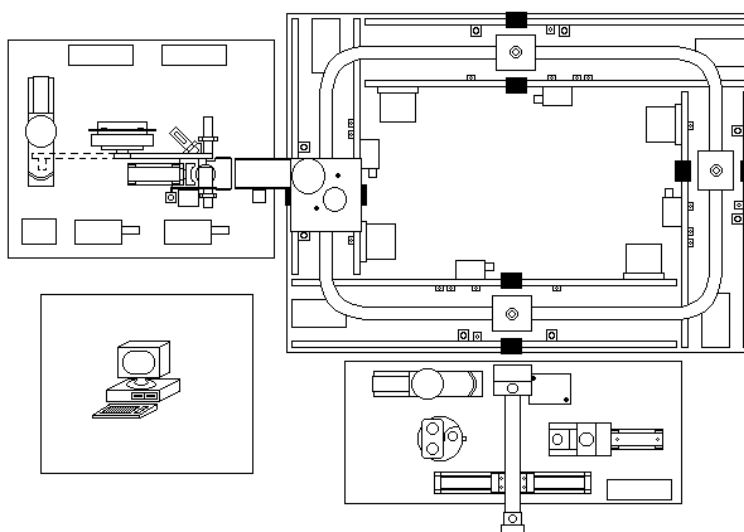


Figura 1. Esquema ilustrativo da célula de manufatura didática (Mini CIM)

## **1.2. Estrutura**

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, contendo a fundamentação teórica para o presente trabalho, como Redes de Petri, controle supervisorio, *Production Flow Schema*, Metodologia de Projeto. No capítulo 3 é apresentada uma descrição do sistema a partir do qual o projeto foi desenvolvido e no capítulo 4 a Metodologia proposta é aplicada, com a definição das necessidades do projeto e modelagens em três níveis de detalhamento, seguidas pelos resultados da simulação da Rede de Petri no *software* HPSim. No capítulo 5 são apresentados os comentários finais e conclusão do trabalho.



## 2. Revisão bibliográfica

Nesta seção são apresentados os conceitos, teorias e ferramentas para o desenvolvimento do presente trabalho.

### 2.1. Rede de Petri

Muito utilizada para descrever SEDs, a rede de Petri possui componentes ativos e passivos. Os componentes passivos são representados por círculos e indicam **lugares** ou condições fixas que não estão ligadas diretamente a ações. Já os elementos ativos são representados por retângulos e indicam **transições**, eventos ou, simplesmente, os atores de determinada ação. **Arcos orientados** indicam o fluxo de itens (informações ou objetos). **Marcas** nos elementos passivos indicam que estão satisfeitas condições ou que há itens naquela posição, possibilitando a ação do elemento ativo (MIYAGI, 1996).

Como pode ser visto na Figura 2, pode haver mais de um **arco** chegando a um elemento ativo e, para que haja a mudança de estado, é necessário que todas suas condições estejam satisfeitas, ocasionando o preenchimento das posições de saída deste elemento ativo (MIYAGI, 1996).

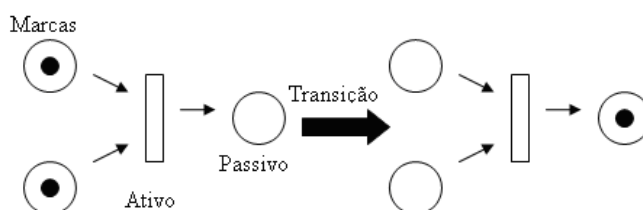


Figura 2. Elementos de rede de Petri

Vale observar que nunca existirão **arcos** ligando dois elementos ativos ou dois passivos. Se isto ocorrer, a separação entre os componentes não foi corretamente avaliada durante a modelagem. Por exemplo, supondo o processo de usinagem utilizando-se duas máquinas, M1 e M2, alimentadas por

esteiras, E1 e E2, sendo que E2 interliga M1 e M2. Ao modelar o processo, a máquina M1 será o componente ativo, indicando a **transição** (no caso a própria usinagem em M1) entre uma esteira (E1) e a outra (E2), ambos elementos passivos. Ocorrida a **transição**, M2 terá sua condição de funcionamento satisfeita. Pode-se ver, portanto, que é necessária a presença da esteira (passiva) para ligar um elemento ativo a outro (Figura 3), um erro comum é considerar a passagens entre as máquinas de forma direta, impossibilitando a análise por rede de Petri (MIYAGI, 1996).

Considerando estes construtores básicos de uma rede de Petri, podem ser criados diversos tipos de modelos, que levam em consideração pontos de vistas diferentes para determinar quais serão os elementos ativos e passivos (MIYAGI, 1996).

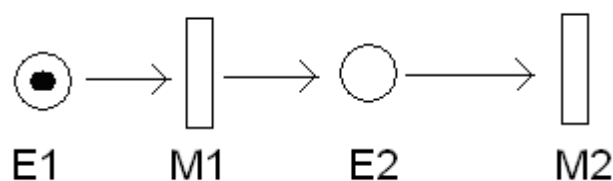


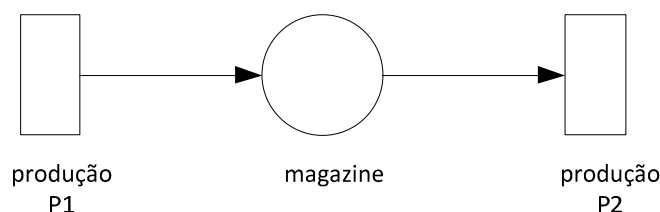
Figura 3. Interação entre elementos ativos e passivos

## 2.2. Production Flow Schema (PFS)

No desenvolvimento das estratégias de controle de SED os eventos identificam certo tipo de atividade que pode incluir vários outros eventos e estados organizados hierarquicamente. Tais eventos devem ser tratados como macro-eventos, de forma que, no caso de SED, ao invés de desenvolver um único passo a estratégia de controle do sistema em nível detalhado, é mais eficiente utilizar uma abordagem do tipo *top-down* onde o conceito de macro-eventos é utilizado para tratar o sistema de forma hierárquica. O PFS é a técnica desenvolvida para sistematizar e facilitar a modelagem por redes (MIYAGI, 1996).

Na tentativa inicial de modelagem de um sistema real, considera-se a divisão do sistema em um número de partes discretas, pois a identificação dessas partes deve facilitar a compreensão do sistema. A Figura 4 ilustra um

esboço de uma divisão inicial de um sistema produtivo em série, que consiste em duas unidades produtivas conectadas por um magazine.



**Figura 4. Estrutura grosseira de um sistema produtivo (MIYAGI, 1996).**

Na representação em PFS, os círculos representam componentes passivos, os retângulos designam componentes ativos e os arcos orientados designam as relações entre os componentes do sistema, de forma que qualquer processo produtivo pode ser decomposto nesses três elementos básicos:

- Elementos (ativos) correspondentes a atividades, designados *atividades*.

Cada atividade representa um macro-evento, ou seja, um componente ativo do sistema, que indica a realização de certas unidades (ou conjuntos) de operações, como produção, transporte e modificação dos itens;

- Arcos orientados, que representam as relações entre os elementos.

Os arcos indicam a direção do fluxo. Arcos conectados na parte externa da atividade (representada entre “[” e ”]”) indicam o fluxo principal e os arcos conectados na parte interna da atividade indicam o fluxo secundário (vide Figura 5);

- Elementos (passivos) correspondentes a distribuições, designados distribuidores.

O Distribuidor corresponde a um lugar onde itens entram e saem. Entre a entrada e a saída, os itens ficam temporariamente alojados.

(MIYAGI, 1996)



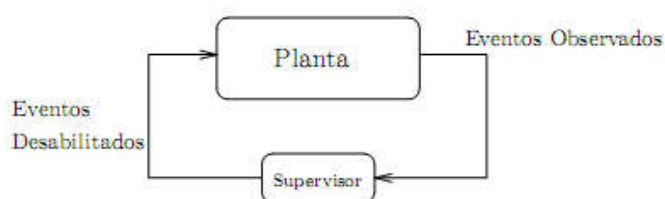
**Figura 5. Atividade no PFS (MIYAGI, 1996)**

As redes PFS mostram claramente os componentes que formam o sistema e quais relações existem entre cada um destes. No caso do PFS, não existe o conceito de **marcas**, **marcações** e sua dinâmica (MIYAGI, 1996).

### **2.3 Controle supervisorio de SED**

Um sistema a ser controlado corresponde geralmente a um conjunto de subsistemas ou equipamentos arranjados segundo uma distribuição especial. Estes subsistemas têm isoladamente um comportamento básico original, que quando atuando em conjunto com os demais subsistemas, deve ser restringido de forma a cumprir a função coordenada a ser executada pelo sistema global (RIBEIRO CURY, 2001).

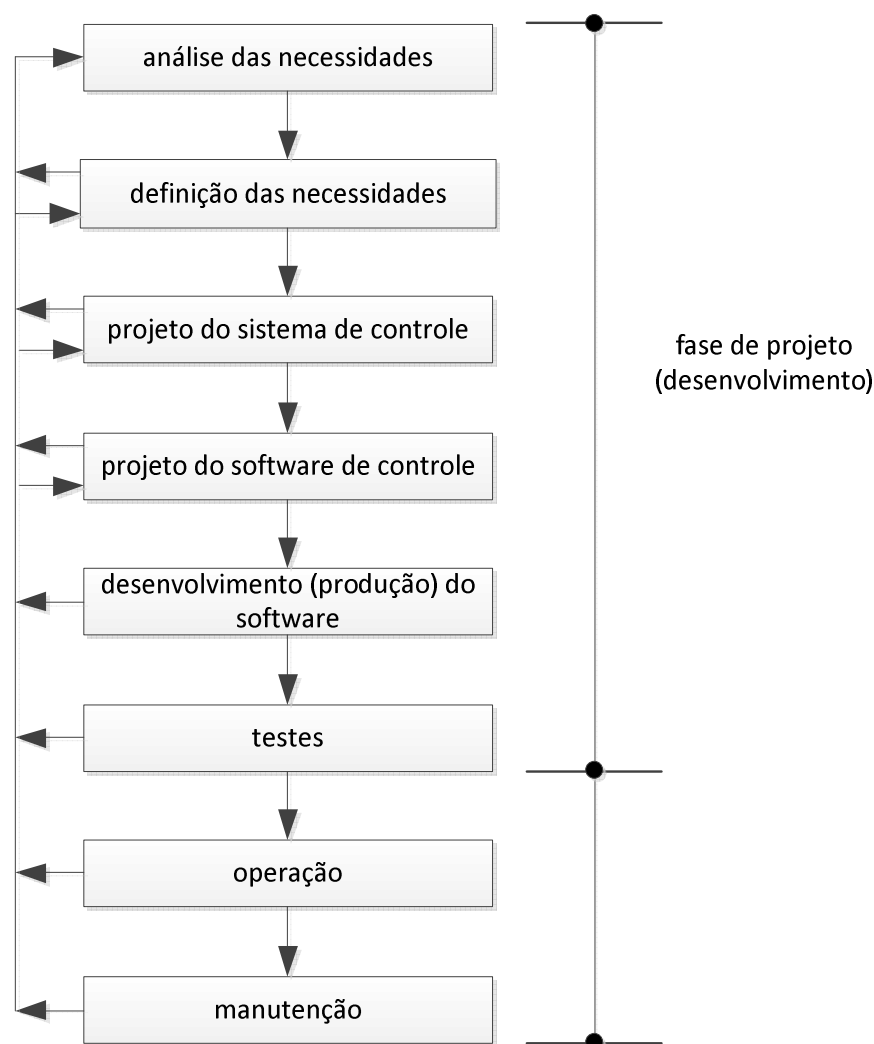
Para que os subsistemas (no caso os equipamentos da estação de montagem do Mini CIM) atuem de forma coordenada, introduz-se um agente de controle, ou supervisor. Considerando-se o supervisor interagindo com a planta em malha fechada (Figura 6), os eventos ocorridos na planta são observados pelo supervisor, que define quais eventos, dentre os fisicamente possíveis de ocorrerem no estado atual, devem se seguir, ou seja, o supervisor tem ação habilitadora e desabilitadora de eventos. O conjunto de eventos habilitados num dado instante pelo supervisor define uma entrada de controle, que é atualizada a cada nova ocorrência de evento observada na planta (RIBEIRO CURY, 2001).



**Figura 6. SED em malha fechada (RIBEIRO CURY, 2001)**

## 2.4 Metodologia de Projeto de Sistemas de Controle

Segundo a metodologia apresentada em MIYAGI (1996), o projeto e desenvolvimento de um sistema de controle pode ser dividido nas etapas ilustradas na Figura 7.



**Figura 7. Ciclo de vida de um sistema de controle (MIYAGI, 1996)**

Dado o contexto do presente trabalho, a fase de implementação não será abordada. Na fase de projeto só será implementada até o projeto do sistema de controle.

A metodologia aqui adotada sugere uma sistematização, relacionada à definição concreta das tarefas em cada etapa do desenvolvimento e especificação dos parâmetros de avaliação da qualidade de cada parte dentro de uma visão geral do sistema de controle (MIYAGI, 1996).

De uma maneira geral, as atividades que definem os procedimentos de controle nos sistemas de controle, e que definem o ciclo e vida dos sistemas, estão listadas abaixo.

- 1) Identificação do objetivo final do sistema;
- 2) Compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos;
- 3) Organização dos conhecimentos sobre o sistema de controle (dispositivo de controle, equipamentos periféricos, etc.);
- 4) Abstração e análise das funções de controle, como os modos de operação e monitoração das instalações e equipamentos;
- 5) Definição das funções de controle;
- 6) Definição do fluxo das funções de controle;
- 7) Divisão das funções e definição das interfaces;
- 8) Definição e alocação dos sinais de entrada e saída;
- 9) Definição da estrutura do programa de controle;
- 10) Projeto de reutilização;
- 11) Projeto do(s) programa(s);
- 12) Projeto de programas não padronizados;
- 13) Desenvolvimento do programa e seu carregamento nas máquinas;
- 14) Teste por unidade;
- 15) Teste do sistema.

Relacionando estes procedimentos com o ciclo de vida do sistema de controle, (1) a (4) compõem a etapa de análise de necessidades, (5) e (6) a etapa de definição das necessidades, (7) a (9) a etapa do projeto do sistema de controle. As etapas correspondentes: (10) a (12): projeto do *software* de controle, (13) desenvolvimento do *software*, (14) e (15) teste; não serão implementadas (MIYAGI, 1996).

### 2.4.1 Análise de necessidades

Esta etapa, por ser a primeira parte na definição do ciclo de vida do sistema de controle, deve ser realizada cuidadosamente, pois o resultado desta análise é a definição das necessidades.

Esta etapa inclui os seguintes passos:

- Identificação do objetivo final do sistema;
- Estudo do objeto de controle, equipamentos e instalações;
- Organização dos conhecimentos sobre os dispositivos e a instalação;
- Levantamento e análise das funções de controle.

### 2.4.2 Definição das necessidades

Na fase de definição das necessidades, é necessário estabelecer uma especificação que satisfaça as relações entre objeto de controle, dispositivo de controle e as funções de controle.

A definição das necessidades do sistema de controle gera as especificações desse sistema. A fim de obter a definição das necessidades do sistema, devem ser definidos:

- As funções de controle

Para definir tais funções, é essencial haver previamente definidas as especificações dos elementos do sistema de controle, que envolvem: dispositivos de atuação, dispositivos de detecção, dispositivos de comando e dispositivos de monitoração.

- O fluxo das funções de controle

Para definição das operações especificadas, devem-se definir os procedimentos que ativam as várias funções de controle previamente definidas. Nesta fase, pode-se representar tal fluxo por redes PFS. Essa representação permite ilustrar os passos em blocos funcionais (atividades) de diferentes níveis conceituais admitindo-se sem dificuldades uma representação estruturada, de forma que esses passos descritos em nível conceitual mais alto (PFS) podem ser gradativamente detalhados (MIYAGI, 1996).

### 2.4.3 Projeto do sistema de controle

- Definição das interfaces e alocação das funções

Esta etapa consiste na definição do tipo e da quantidade de dispositivos de controle a serem utilizados na realização das funções de controle definidas nas etapas anteriores (MIYAGI, 1996).

- Definição e alocação dos sinais de entrada e saída

De acordo com os documentos elaborados na etapa de definição das necessidades e a lista de interfaces, são então definidos os tipos das unidades de entrada e saída (I/O) do dispositivo de realização do controle e as respectivas alocações dos sinais de I/O (MIYAGI, 1996).

- Definição da estrutura do programa

A estrutura o programa deve considerar:

- Facilidade de leitura e compreensão do programa;
- Capacidade para fácil reutilização de programas;
- Possibilidade de divisão em níveis, isto é, aqueles com processamento em alta velocidade e aqueles com processamento em baixa velocidade, com base nas funções de controle envolvidas;
- Facilidade de manutenção, possibilitando expansões e modificações no programa;
- Facilidade na avaliação das funções na fase de testes.

O programa, num nível conceitual mais elevado, ou seja, no nível “macro” controla os módulos funcionais “macros”, e dentro de cada módulo funcional “macro”, os programas de controle detalhados controlam os módulos funcionais detalhados, de forma que estrutura do programa seja baseada neste conceito (MIYAGI, 1996).



### 3. Célula de manufatura didática

Para desenvolvimento do projeto, como citado na introdução, será utilizada a célula de manufatura didática (Mini CIM) presente no Laboratório de Sistemas de Controle da Escola Politécnica.

O Mini CIM é usado para montagem de determinadas peças: Cilindro de corpo rosa e pino preto, cilindro de corpo prateado (alumínio) e pino preto, e cilindro de corpo preto e pino cinza. A Figura 8 ilustra a composição de cada tipo de peça:

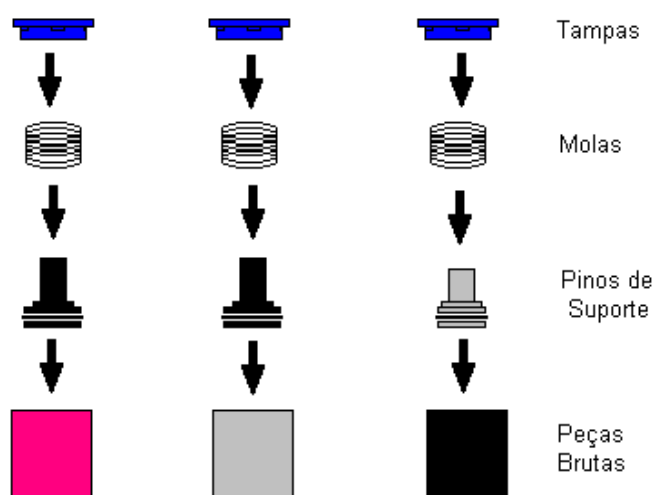


Figura 8. Montagem das diferentes peças pelo Mini CIM

A mini célula de manufatura é composta por 4 subestações, como ilustrado na Figura 9.

#### 3.1. Estação de distribuição

É uma estação composta por um magazine com ejeter, alimentadores de cavidades vibratórios, transportadores inclinados e silos com dispositivos limitadores de alimentação.

Essa estação tem como funções:

- Separar uma peça do magazine de distribuição;
- Disponibilizar a peça para o processo subsequente (inspeção).

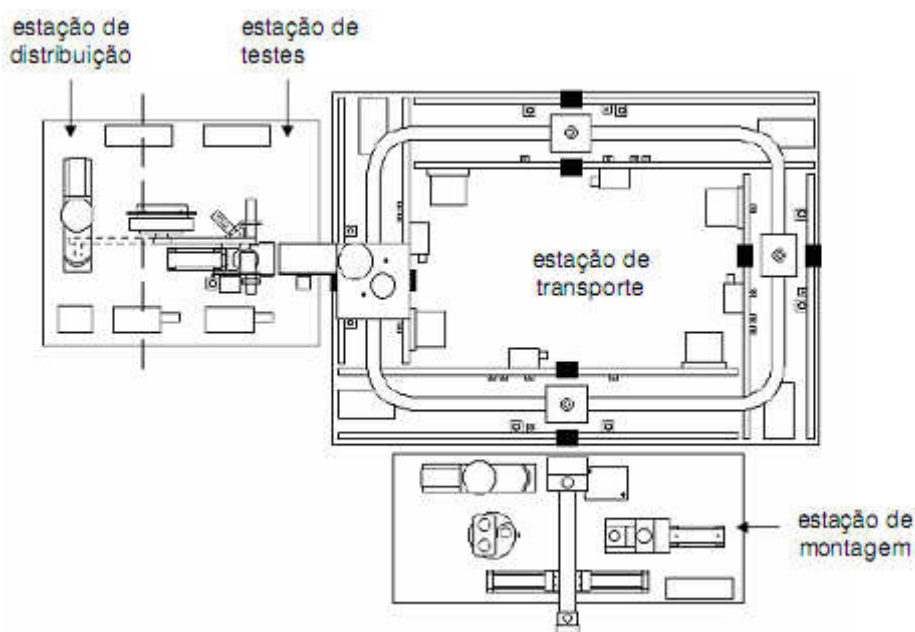


Figura 9. Esquema ilustrativo da mini célula de manufatura didática (Mini CIM)

### 3.2. Estação de inspeção ou de testes

A estação de inspeção adquire informação quanto a características físicas das peças, e faz uma distinção entre uma peça aceita para continuidade do processo ou uma peça rejeitada para tanto.

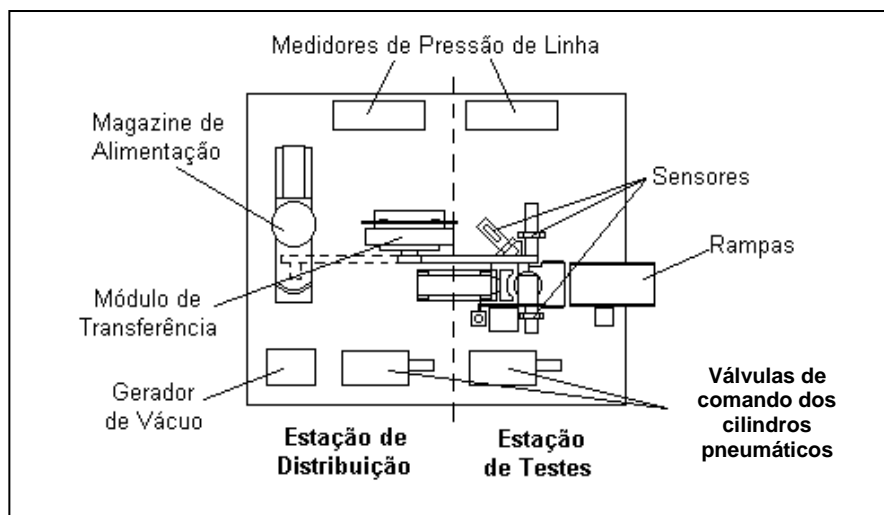
As funções da estação de inspeção são:

- Estabelecer as características do material da peça;
- Checar as dimensões da peça;
- Descartar ou disponibilizar uma peça para a estação subsequente.

Essa unidade é caracterizada por dois níveis. No nível inferior estão dispostos três sensores: indutivo, óptico e capacitivo. O sensor óptico é o único que permanece acoplado à plataforma elevatória, sendo que os demais são fixos na base da unidade. O sensor indutivo identifica peças metálicas, o sensor óptico identifica peças coloridas (metálicas e rosas) e o sensor capacitivo identifica a presença de peça, sendo que os sinais emitidos pelos sensores devem ser analisados em conjunto, para uma identificação correta da peça.

O nível superior realiza o teste de altura das peças por meio de uma haste com um atuador/cilindro pneumático e um sensor piezelétrico.

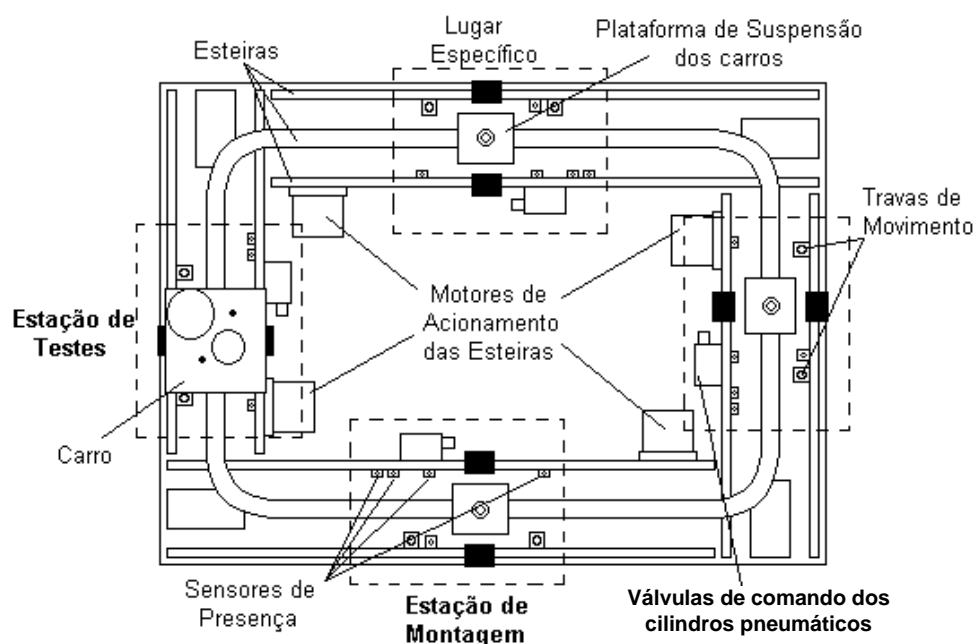
Após a realização dos testes, as peças aprovadas seguem para o carro transportador por meio de uma rampa (superior), ou são descartadas por uma rampa (inferior). A Figura 10 apresenta um esquema ilustrativo das estações de teste e distribuição.



**Figura 10. Estações de distribuição e testes**

### **3.3. Estação de transporte**

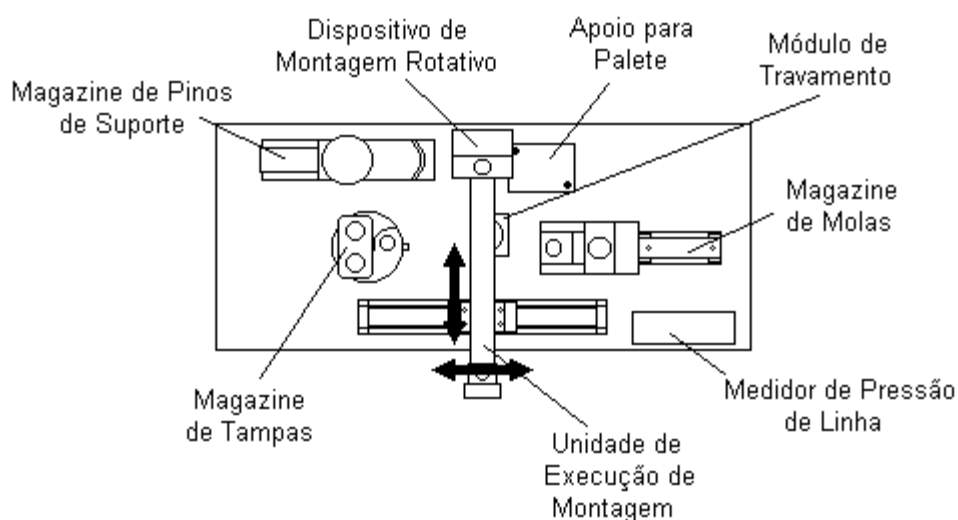
E estação de transporte ou sistema inteligente de transporte é um conjunto de esteiras que forma um circuito, sendo que, uma vez acionados os motores, as esteiras permanecem todas em movimento. No circuito há quatro posições de parada dos carros pré-determinadas, onde ocorrem carregamentos e descarregamentos. Em cada uma dessas posições há um conjunto de sensores de presença e travas de movimento para realização das tarefas previstas. Na presente montagem do Mini CIM, são utilizadas somente as duas paradas (Figura 11), sendo que a primeira é destinada à estação de distribuição e testes, e a segunda destinada à estação de montagem.



**Figura 11. Detalhamento dos componentes da estação de transporte**

### **3.4. Estação de montagem**

A Figura 12 fornece uma ilustração geral dos componentes da unidade de montagem.



**Figura 12. Detalhamento dos componentes da Estação de Montagem**

Essa estação tem como finalidade executar a montagem de uma peça determinada para fins didáticos. A peça Corpo chega através do sistema de

transporte do Mini CIM. Esse corpo pode ser de alumínio, de plástico preto ou de plástico rosa.

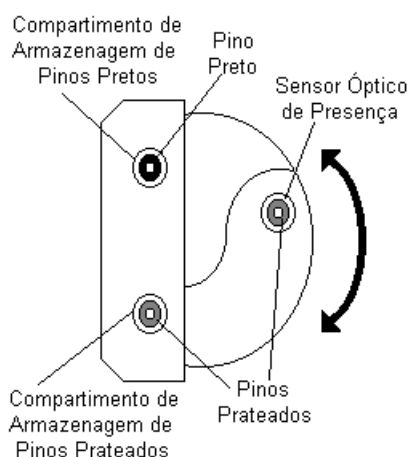
A montagem procede da seguinte forma: Com a chegada da peça Corpo, ela é posicionada no módulo de travamento para inserção de um pino de suporte, seguida de uma mola e uma tampa. Finalizada a montagem com a fixação da tampa, a peça pronta é novamente posicionada no carro do sistema transportador para que as rotinas subseqüentes da célula de manufatura possam ser efetuadas.

Uma descrição mais detalhada da rotina de montagem é apresentada no Capítulo 4.

### Componentes da estação de montagem:

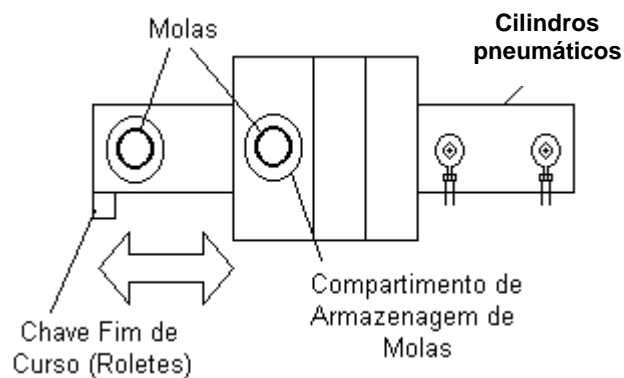
Para realização do projeto de controle e supervisão desta estação são apresentados a seguir seus componentes constituintes e suas funcionalidades.

- **Magazine de pinos de suporte** - responsável pela disponibilização de um dos dois tipos de pinos, preto e prateado (Figura 13).



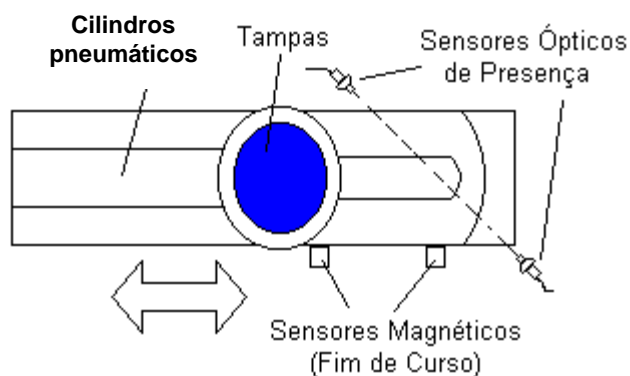
**Figura 13. Magazine de pinos de suporte**

- **Magazine de molas** - responsável pela disponibilização das mesmas (Figura 14).



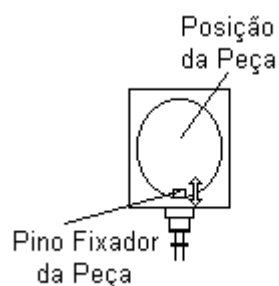
**Figura 14. Magazine de molas**

- **Magazine de tampas** - disponibiliza as tampas dos cilindros (Figura 15).



**Figura 15. Magazine de tampas**

- **Módulo de travamento** - fixa a peça Corpo à plataforma da estação (Figura 16).



**Figura 16. Módulo de travamento**

Além dos módulos apresentados, há também uma unidade de montagem cartesiana, que constitui a estrutura de sustentação da Garra Dedicada. Para que a garra possa executar a montagem, esta possui 4 graus de liberdade: translação nos eixos x,y e z e uma rotação de sua Garra Dedicada em torno de z. A seguir, os atuadores e sensores envolvidos no acionamento das translações e rotações citadas são descritos:

- **Eixo x e y:**

Nestes dois eixos a movimentação é feita por motores de corrente contínua ligados a eixos “sem-fim”, que têm suas rotações detectadas por *encoders*, com o intuito de obter seu posicionamento em relação à posição inicial (Figuras 17 (a) e (b)). Para que estes *encoders* sejam interpretados é utilizado um módulo ligado diretamente no CLP (Figura 18). Funcionando como dispositivos de segurança há chaves de fim de curso, que também possibilitam o posicionamento absoluto dos eixos.



(a)



(b)

Figura 17. (a) - Acionamento do eixo y; (b) - Acionamento do eixo x

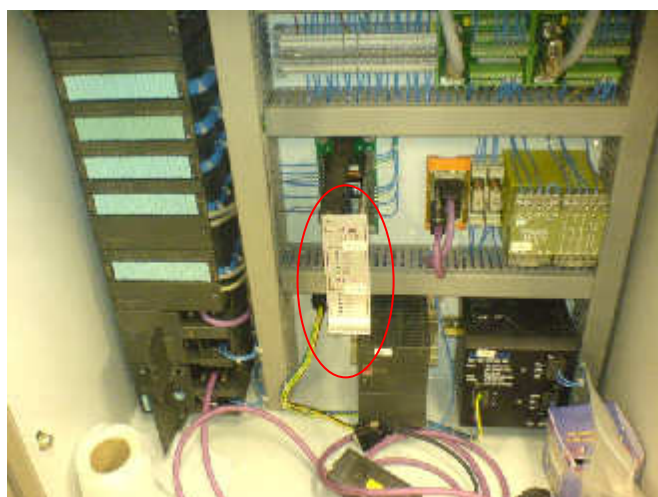


Figura 18. CLP e módulo de controle dos motores (destaque)

- **Eixo z:**

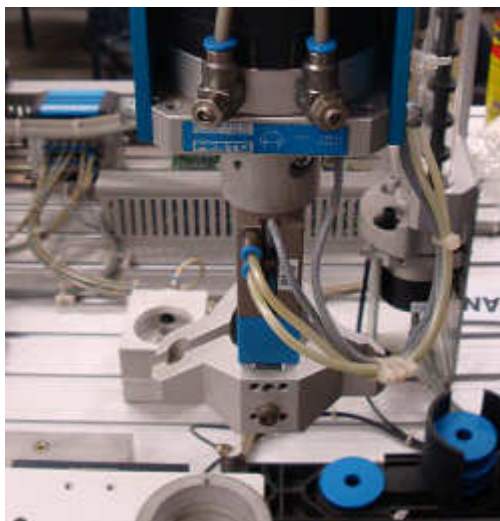
Este eixo também é acionado por um motor de corrente contínua e um “sem-fim”, mas não utiliza *encoder*. Para determinar a posição que este eixo se encontra durante o movimento existem 4 sensores de posição (Figura 19), além de chaves de fim de curso.



Figura 19. Eixo Z (Guia Z), sensores de posição e Garra Dedicada

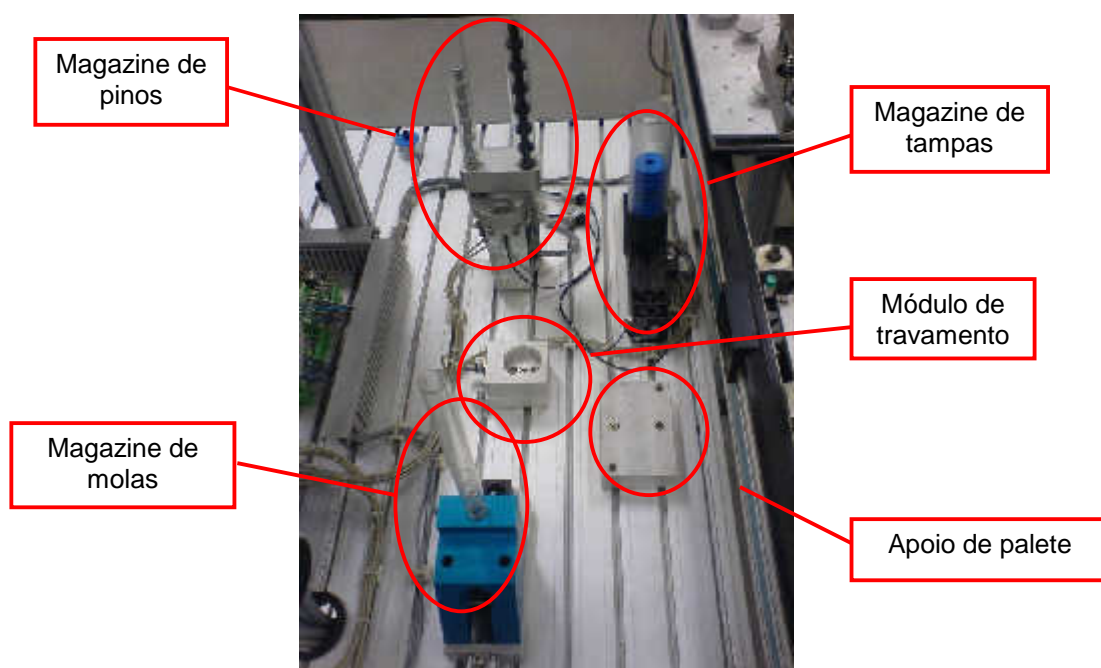


A fim de realizar algumas ações, como, por exemplo, a montagem da tampa, a Garra Dedicada (Figura 20) possui uma rotação em z de  $270^\circ$ , proporcionada por um cilindro pneumático rotativo.



**Figura 20. Detalhes da Garra Dedicada**

Esta estação possui, ainda, um apoio para palete, onde o carrinho é posicionado durante a montagem. Este apoio pode ser visto juntamente com os outros magazines e o módulo de travamento na Figura 21.



**Figura 21. Magazines, apoio de palete e módulo de travamento**

## **4. Projeto**

O projeto proposto visa uma abordagem de modelagem e simulação por Rede de Petri (RdP) de um sistema produtivo. Tal execução é proposta seguindo a Metodologia de Projeto de Sistemas de Controle proposta por Miyagi (1996) e o sistema produtivo alvo é a Estação de Montagem robotizada da Mini Célula de Manufatura Didática (Mini CIM).

Primeiramente seguindo a metodologia adotada, serão detalhados os itens de 1 a 9 ilustrados na página 9, item 2.4. Ou seja, de acordo com a metodologia, é descrito de forma detalhada todo o processo de montagem ocorrido na estação, juntamente com um mapeamento dos sensores de atuadores envolvidos no processo. Em seguida é feita uma análise e definição das necessidades. Tal análise envolve um estudo do objeto de controle, incluindo um mapeamento dos sensores e atuadores e definição das funções de controle envolvidas no processo. Posteriormente será feita a modelagem em três níveis de detalhamento. Os dois primeiros serão modelados em PFS e o nível mais baixo, que exige um grau de especificidade maior será feito em Rede de Petri.

### ***4.1 Identificação do objetivo final do sistema:***

O objetivo final do sistema é bem definido, ou seja, consiste na montagem de peças com três configurações diferentes, envolvendo uma peça Corpo, um pino, uma mola e uma tampa.

### ***4.2 Compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos:***

Para a compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos do sistema, será feita primeiramente uma descrição detalhada do funcionamento de tal, envolvendo os equipamentos já listados no item 3.4.

**Funcionamento da estação de montagem:**

A seguir é apresentada uma descrição sistemática das tarefas que descrevem funcionamento da estação de montagem:

A peça Corpo é trazida pelo carro de transporte até uma determinada posição acusada pelos sensores do sistema de transporte da manufatura didática. Esse carro transportador é imediatamente suspenso pela Garra Dedicada e então posicionado sobre o apoio de palete. É a partir deste ponto que a operação de montagem é iniciada.

A próxima etapa consiste no posicionamento da peça Corpo no módulo de travamento (Fig. 16) da estação. Para tanto, a unidade de execução de montagem cartesiana é movida até a posição onde se encontra essa peça Corpo (no carro transportador que está sobre o apoio de palete). A Garra Dedicada em seguida pega a peça Corpo e o transfere para o módulo de travamento, onde ele é fixado pelo restante do processo de montagem.

A Garra Dedicada então é direcionada ao magazine de pinos de suporte (Fig. 13), onde ela retira um pino. Para peças pretas ou de plástico, o pino deve ser de alumínio, já para peças rosa ou prateadas, ele deve ser de plástico preto.

O pino é então posicionado sobre o módulo de travamento e em seguida pressionado sobre a peça Corpo.

A seguir, uma mola é retirada do magazine de molas (Fig. 14) e posicionada sobre o módulo de travamento para que seja montada na peça Corpo.

Uma tampa é extraída do magazine de tampas (Fig. 15) e encaminhada ao mesmo módulo de travamento, onde é rotacionada em 270° na peça, pelo dispositivo de montagem rotativo para que seja fixada na peça corpo.

A partir desse ponto está completa a montagem. O módulo de travamento desprende a peça, que é novamente colocada pela Garra Dedicada no carro de transporte. Logo em seguida a garra se prende ao carro e o posiciona novamente no sistema transportador do Mini CIM.

### **4.3 Organização dos conhecimentos sobre o sistema de controle (dispositivo de controle, equipamentos periféricos, etc.):**

Além dos itens já listados no item 3.4, para a organização dos conhecimentos sobre o sistema, será feito um mapeamento dos sensores e atuadores do sistema:

#### **Mapeamento dos sensores e atuadores**

A Tabela 1 apresenta o mapeamento dos sensores e atuadores envolvidos no processo de montagem:

**Tabela 1. Lista de sensores e atuadores**

<b>Número</b>	<b>Sensor</b>
1	Sensor - Garra Dedicada Fechada
2	Sensor - Garra Dedicada Aberta
3	Sensor - Cilindro de mola recuado
4	Sensor - Cilindro de tampa estendido
5	Sensor - Cilindro de tampa recuado
6	Sensor – Garra Dedicada em 0 grau
7	Sensor – Garra Dedicada em 270 graus
8	Detecta a Garra Dedicada no ponto superior
9	Detecta a Garra Dedicada no ponto intermediário superior
10	Detecta a Garra Dedicada no ponto intermediário inferior
11	Detecta a Garra Dedicada no ponto inferior
12	Sensor de pino prata
13	Sensor de pino preto
14	Atuador para fechar Garra Dedicada
15	Atuador para colocar a Garra Dedicada em 0 grau
16	Atuador para colocar a Garra Dedicada em 270 graus
17	Atuador para tirar o pino prata
18	Atuador para tirar o pino preto
19	Atuador para recuar cilindro mola
20	Atuador para recuar cilindro tampa
21	Atuador para estender seguro
22	Atuador para subir a Garra Dedicada

#### **4.4 Abstração e análise das funções de controle, como os modos de operação e monitoração das instalações e equipamentos:**

Para essa abstração e análise das funções de controle, primeiramente serão analisadas as necessidades do sistema como um todo, de modo que seus requisitos sejam definidos e satisfeitos pelas posteriormente definidas funções de controle.

A modelagem deve permitir uma descrição suficientemente detalhada do funcionamento do sistema. O modelo deve ficar claro em um nível global do sistema e o nível de detalhamento deve ser suficiente para que a lógica de controle projetada permita uma análise completa do *software* que deverá ser implementado no CLP, prevendo e solucionando possíveis “*Deadlocks*”.

A seguir são listadas as necessidades do sistema:

- Mapeamento completo dos sensores e atuadores envolvidos no processo;
- Definição das funções de controle;
- Modelagem clara em nível global do sistema;
- Modelagem suficientemente detalhada para previsão e solução de possíveis “*Deadlocks*”.

#### **4.5 Definição das funções de controle:**

O próximo passo de acordo com a metodologia seguida é a definição das funções de controle envolvidas no processo de montagem na estação que é o objeto de estudo. Por meio do mapeamento dos sensores e atuadores, as funções foram definidas de forma a atender aos requisitos do projeto da lógica de controle da estação de montagem do Mini CIM.

A seguir são enumeradas as funções de controle:

- F1      Posiciona X
- F2      Posiciona Y
- F3      Posiciona Z
- F4      Abre garra
- F5      Fecha garra

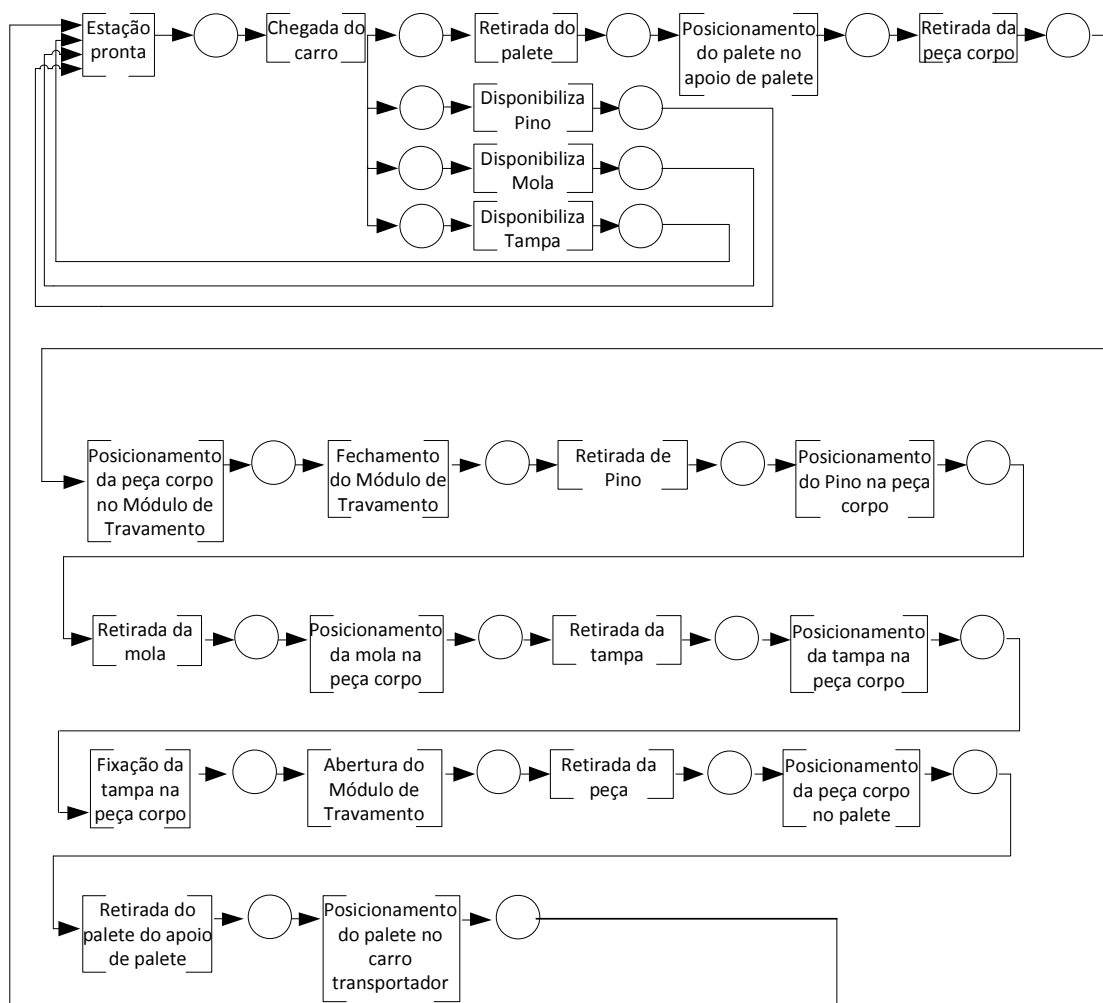
- F6 Fecha módulo de travamento
- F7 Abre módulo de travamento
- F8 Rotaciona garra em 270 ° no sentido horário
- F9 Rotaciona garra em 270 ° no sentido anti-horário
- F10 Estende pistão do magazine de molas
- F11 Recua pistão do magazine de molas
- F12 Estende pistão do magazine de tampas
- F13 Recua pistão do magazine de tampas
- F14 Gira encaixe de pinos sentido horário
- F15 Gira encaixe de pinos sentido anti-horário

#### **4.6 Definição do fluxo das funções de controle:**

Definidas as funções de controle do sistema, a seguir é apresentada a modelagem a nível mais alto, utilizando-se a ferramenta *Production Flow Schema* (PFS), afim de que à medida que os processos são detalhados pela modelagem, o fluxo das funções de controle seja definido.

#### **Modelagem PFS – Primeiro nível de detalhamento**

A Figura 22 consiste na modelagem do sistema a nível mais baixo de detalhamento. Em termos de aproximação de linguagem humana, este será o nível mais alto apresentado neste trabalho. Esta modelagem descreve o funcionamento da estação de montagem desde o momento em que a estação está pronta para a montagem e o carro transportador chega ao ponto de parada para início deste processo, até o ponto em que a peça pronta é colocada no palete, e o palete posicionado novamente sobre o carro transportador para prosseguimento dos demais processos do Mini CIM.



**Figura 22. Modelagem em PFS – Nível mais baixo de detalhamento**

A Figura 22 detalha o processo de montagem no nível atividades, como “Retirada de Pino” e “Posicionamento da tampa na peça corpo”. Cada atividade deste tipo envolve algumas funções e sub-rotinas que se repetem em novas atividades, como será visto mais adiante.

Na próxima etapa de projeto, a modelagem procede de maneira mais detalhada, abordando cada atividade do primeiro nível de modelagem que necessite de maior detalhamento e em nível de funções de controle.

#### **4.7 Divisão das funções e definição das interfaces**

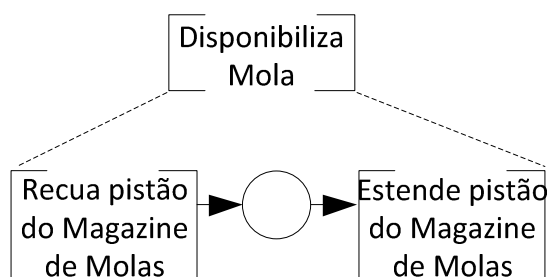
O primeiro nível de detalhamento da modelagem em PFS (Figura 22) divide a etapa de montagem em atividades definidas por cada par de colchetes (exemplo: “[Chegada do carro]”). Então cada transição entre essas atividades

define uma interface. Ou seja, no processo de definição do fluxo das funções de controle, foram definidas também as interfaces.

### Modelagem PFS – Segundo nível de detalhamento

A seguir são apresentadas as sub-rotinas envolvidas no processo de montagem, de forma em que cada uma dessas sub-rotinas, algumas funções de controle se repetem constantemente. Cada sub-rotina dessas representa um estágio de detalhamento anterior à definição da lógica de controle proposta neste projeto, que será definida em Rede de Petri.

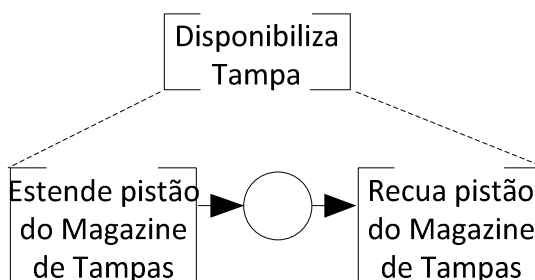
A Figura 23 ilustra o processo de disponibilização de mola em PFS. Para disponibilização da mola utilizada na montagem, o Mini CIM conta com um Magazine de Molas (Figura 14). Na parte inferior do magazine esta acoplado um pistão pneumático que recua e estende, posicionando a mola na saída de mola, onde posteriormente ela será pega pela Garra Dedicada e montada junto à peça Corpo. Junto à saída de molas há um sensor de presença e juntamente ao pistão há um sensor de posição que indica se o pistão está estendido ou recuado.



**Figura 23. Disponibilização de molas**

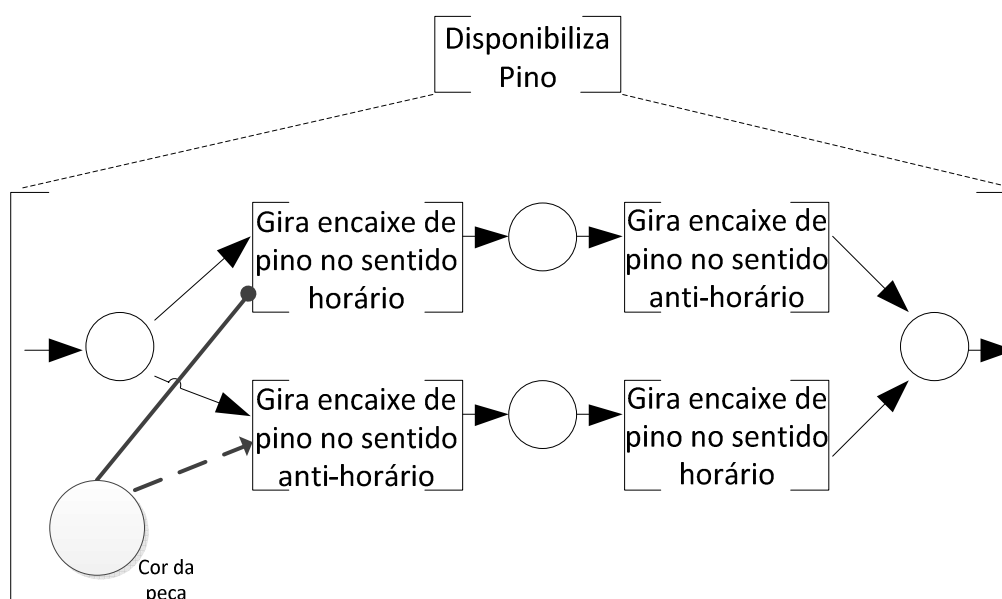
A Figura 24 ilustra o processo de disponibilização de tampa em PFS. Para disponibilização da tampa a ser acoplada na peça Corpo, o Mini CIM dispõe, assim como os magazines de molas e pinos, um Magazine de Tampas (Figura 15). Na parte inferior do Magazine de Tampas, há um pistão pneumático e dois sensores óticos. O pistão estende para posicionamento da tampa na saída de tampa e recua novamente. Os sensores indicam que o pistão está estendido e a presença de tampa, e após essa leitura dos sensores, o controlador envia o sinal para retorno do pistão.





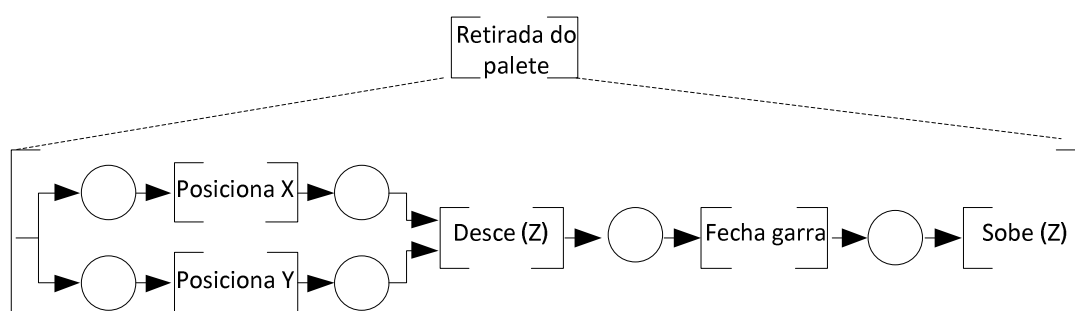
**Figura 24. Disponibilização de tampas**

Para disponibilização de pinos, o encaixe de pinos (Figura 13), recebe a informação correspondente à cor da peça (pino prateado para peças pretas ou pino preto para peças rosa ou prateadas) gira em sentido horário (pinos prateados) ou sentido anti-horário (pinos pretos) e após um determinado tempo (para que a ação da gravidade faça o pino cair sobre o encaixe) gira no sentido oposto para posicionamento do pino para acesso da Garra Dedicada (Figura 25). Nesta operação, a modelagem mescla PFS e Rede de Petri. O **lugar** correspondente à informação quanto à cor da peça, é ilustrado. Saindo deste **lugar** há o **arco inibidor** que leva à transição que faz o giro do encaixe no sentido horário (caso não haja **marcação** no **lugar** “Cor da Peça”), e o **arco habilitador** que leva à transição que faz o giro do encaixe no sentido anti-horário (caso haja **marcação**).



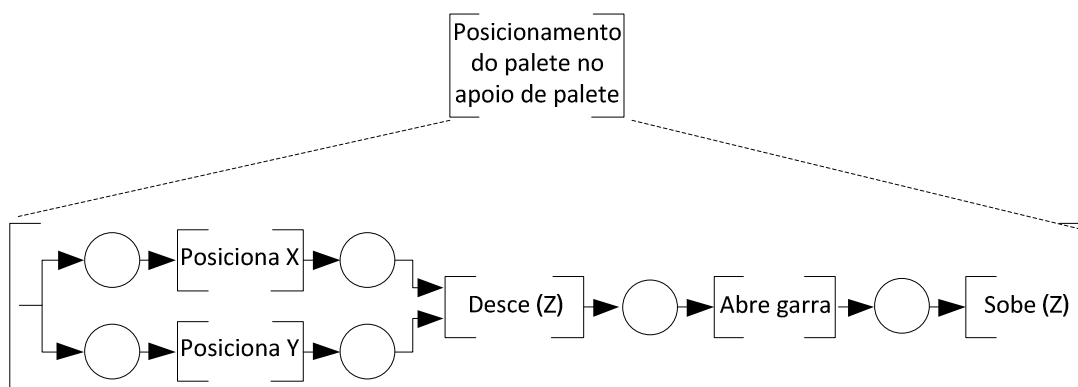
**Figura 25. Disponibilização de pino**

Para a retirada do palete do Carro Transportador (Figura 26), a Garra Dedicada deve ser movimentada nas Guias correspondentes aos eixos X e Y. Cada uma dessas Guias dispõe de um servo motor, sensores de final de curso e *encoders* para leitura do posicionamento. Após posicionamento nos eixos X e Y, a Garra Dedicada é movimentada ao longo da Guia correspondente ao eixo Z, descendo. Essa Guia dispõe, além dos sensores de final de curso, de quatro sensores de posição. Isso quer dizer que para posicionamento da Garra Dedicada ao longo da Guia Z, há apenas quatro lugares distintos onde a Garra Dedicada pode ser posicionada.



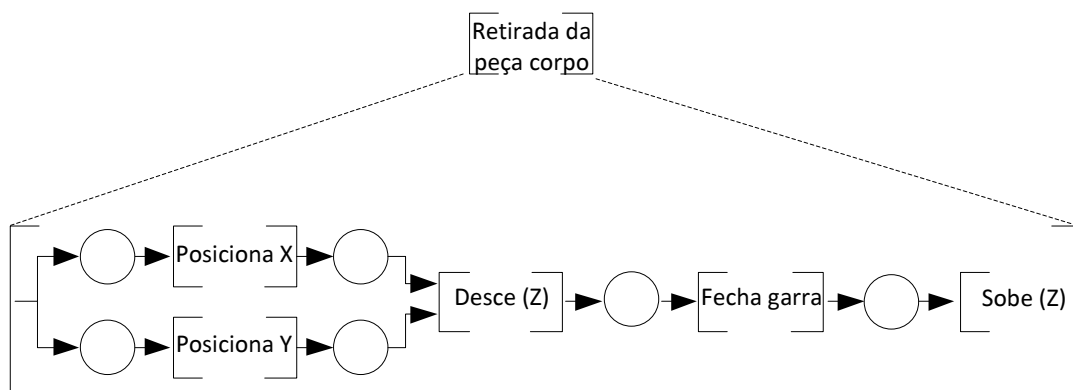
**Figura 26. Retirada do palete**

Estando o palete acoplado à Garra Dedicada, são feitos os posicionamentos em X, Y e a Garra Dedicada desce ao longo da Guia Z, posicionando a Garra Dedicada diretamente sobre o Apoio de palete e então a Garra Dedicada é aberta, posicionando o palete sobre o apoio. Feita essa operação, a Garra Dedicada sobe novamente sobre a Guia Z, voltando à posição mais elevada (Figura 27).



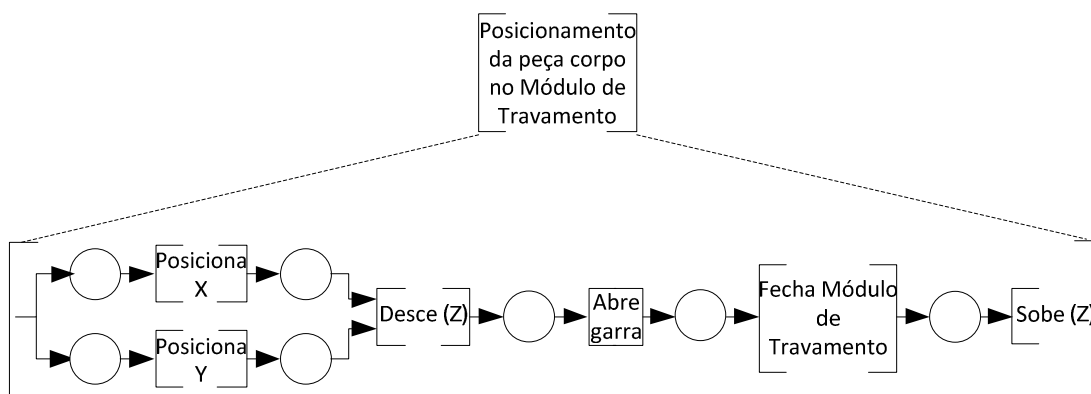
**Figura 27. Posicionamento do palete no apoio de palete**

O passo seguinte da montagem é a retirada da peça Corpo do palete e sua fixação no Módulo de Travamento. Após posicionamento dos eixos na posição desejada, a Garra Dedicada é fechada para acoplamento da peça Corpo e volta a subir pela Guia Z (Figura 28).



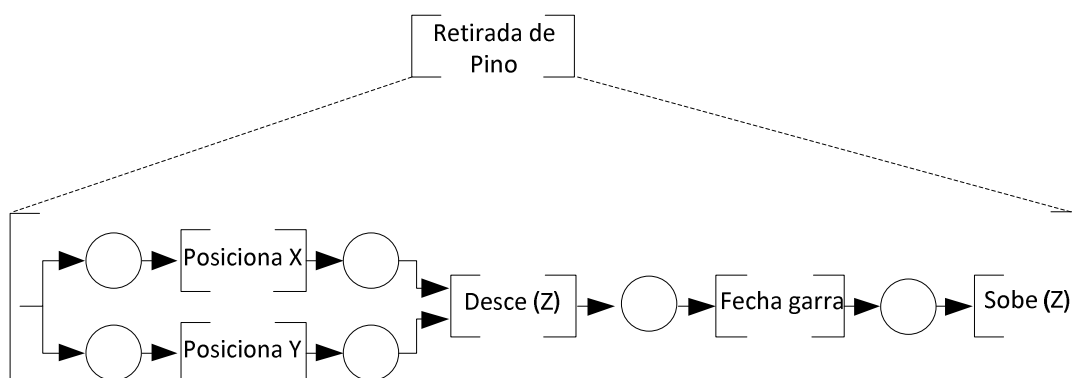
**Figura 28. Retirada da peça corpo do palete**

A garra é posicionada ao longo dos eixos sobre o Módulo de Travamento, em seguida é aberta, colocando a peça Corpo no Módulo de Travamento. Quando o sensor presente no módulo acusa a presença da peça, o módulo é então fechado, travando a peça Corpo. Após o fechamento, a Garra Dedicada é então elevada (Figura 29).



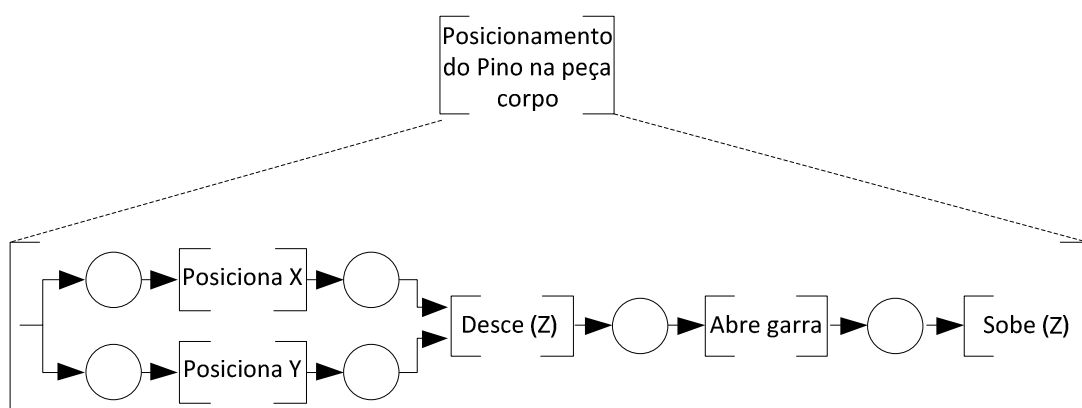
**Figura 29. Posicionamento da peça corpo no Módulo de Travamento**

Para retirada do pino do Magazine de Pinos, a Garra Dedicada é posicionada ao longo dos eixos sobre o Magazine de Pinos, desce ao longo da Guia Z, é fechada acoplando-se ao pino e sobe novamente (Figura 30).



**Figura 30. Retirada de pino no Magazine de Pinos**

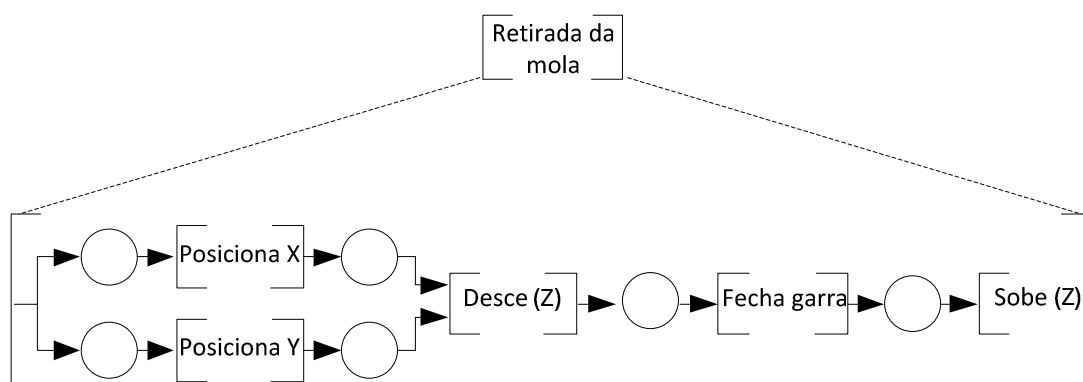
A Garra Dedicada é posicionada diretamente sobre a peça Corpo, após os *encoders* e sensores de posição acusarem que a posição desejada foi alcançada, ela então desce e se abre, deixando o pino dentro da peça Corpo. A Garra Dedicada sobe novamente finalizando esta etapa (Figura 31).



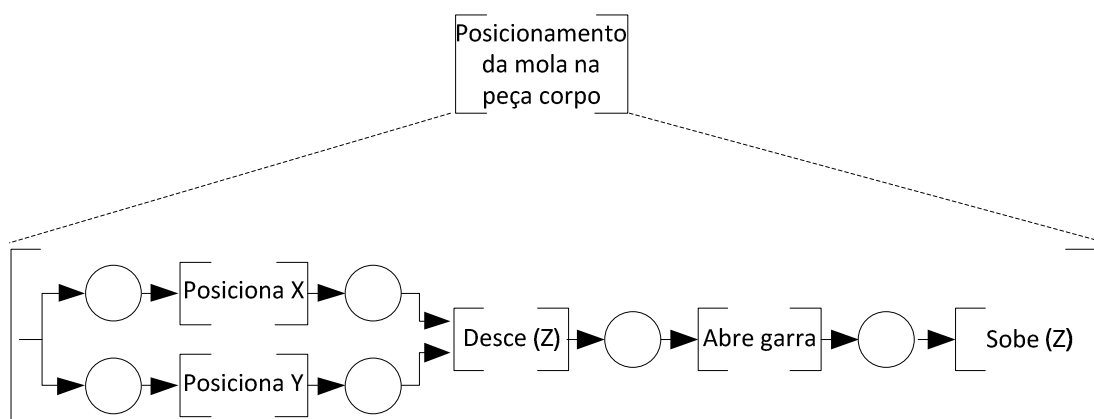
**Figura 31. Posicionamento do pino na peça corpo**

A rotina para retirada da mola do Magazine de molas é semelhante à retirada do pino do Magazine de Pinos, porém com localização diferente do Magazine de Molas. A Garra Dedicada é fechada acoplando a mola e então sobe ao longo da Guia Z (Figura 32).

A rotina para posicionamento da mola sobre o pino que está localizado dentro peça corpo consiste no posicionamento da Garra Dedicada ao longo dos eixos X e Y, descida da mesma, abertura para liberação da mola sobre o pino e finalmente subida ao longo da Guia Z (Figura 33).

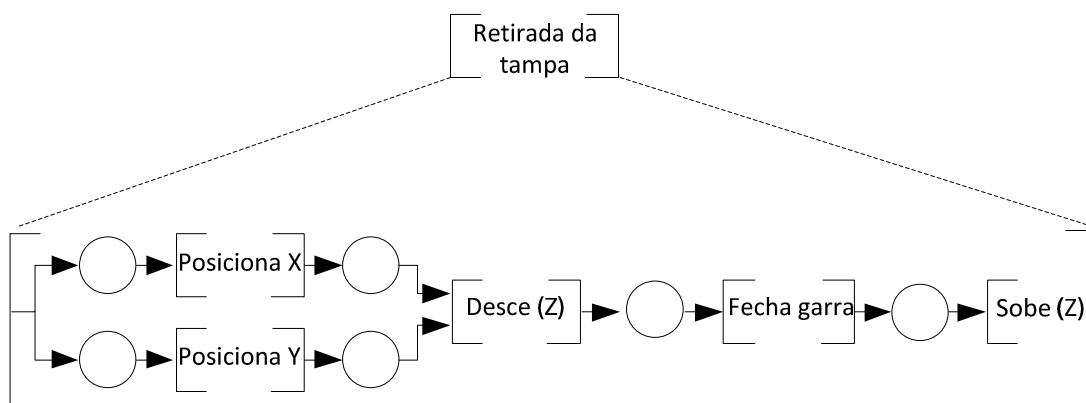


**Figura 32. Retirada de mola do Magazine de Molas**



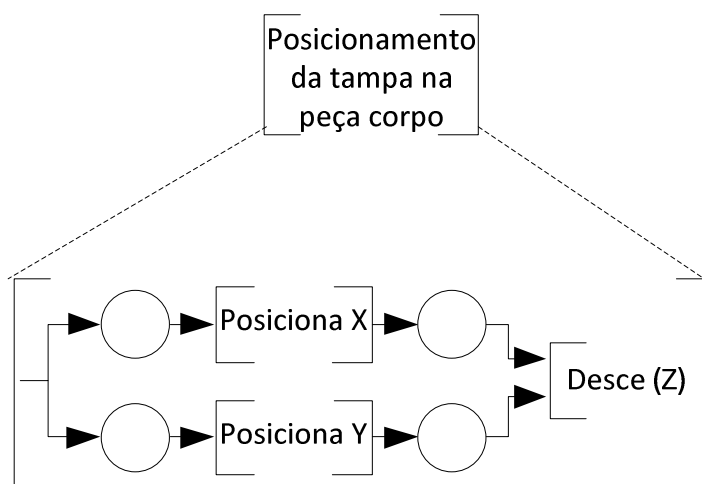
**Figura 33. Posicionamento da mola na peça corpo**

Para retirada da tampa do Magazine de Tampas, a Garra Dedicada é posicionada sobre a saída de tampas no magazine, então fechada, acoplando-se à tampa e novamente é elevada ao longo da Guia Z (Figura 34).



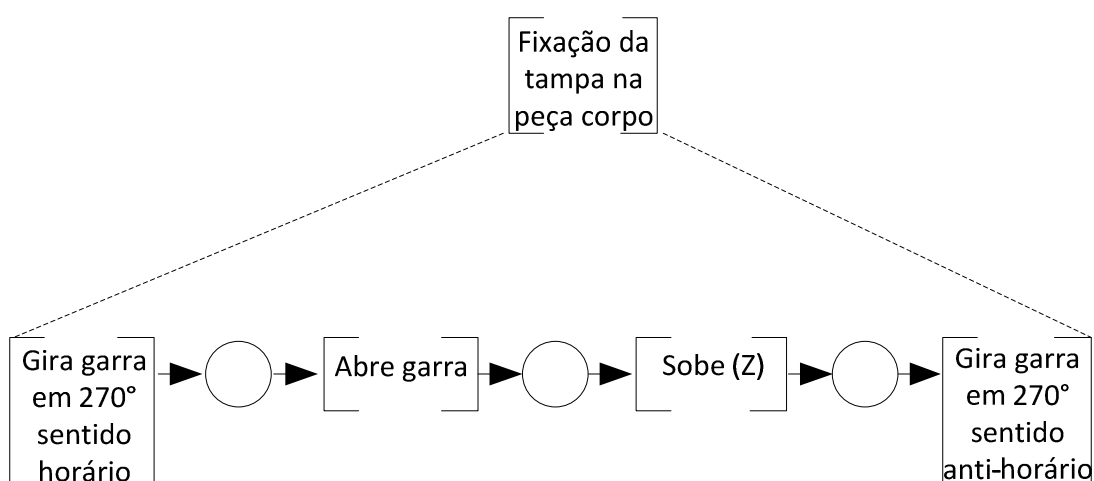
**Figura 34. Retirada da tampa do Magazine de Tampas**

A Garra Dedicada é posicionada diretamente sobre a peça Corpo ao longo dos eixos X, Y e Z, posicionando a tampa diretamente sobre a peça, que já contém o pino e a mola encaixados (Figura 35).



**Figura 35. Posicionamento da tampa na peça corpo**

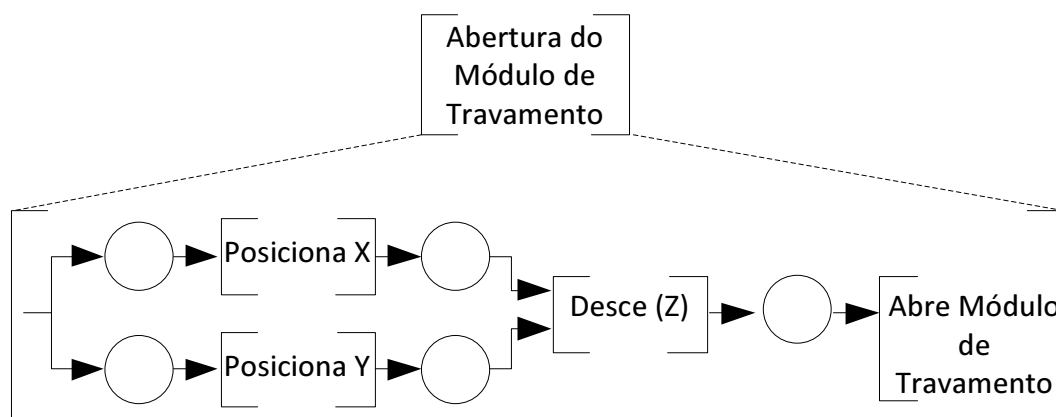
Para fixação da tampa na peça, a garra gira  $270^\circ$  no sentido horário, fixando a tampa sobre a peça Corpo. Feita essa operação, a garra é aberta, sobe ao longo da Guia Z até a posição mais alta e rotaciona novamente  $270^\circ$ , agora no sentido anti-horário, voltando à orientação original (Figura 36).



**Figura 36. Fixação da tampa na peça corpo**

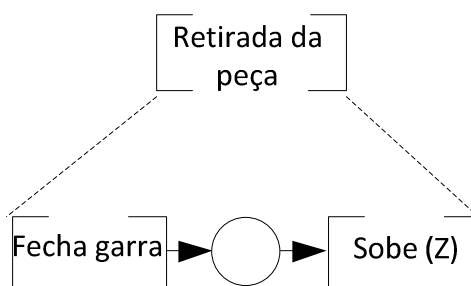
Nesta etapa a montagem da peça está completa, ou seja, a peça já dispõe do pino e da mola, encaixados pela tampa que foi fixada. O próximo

passo é a abertura do Módulo de Travamento para liberação da peça. A Garra Dedicada é posicionada diretamente sobre a peça e o Módulo de Travamento é então aberto (Figura 37).



**Figura 37. Abertura do Módulo de Travamento**

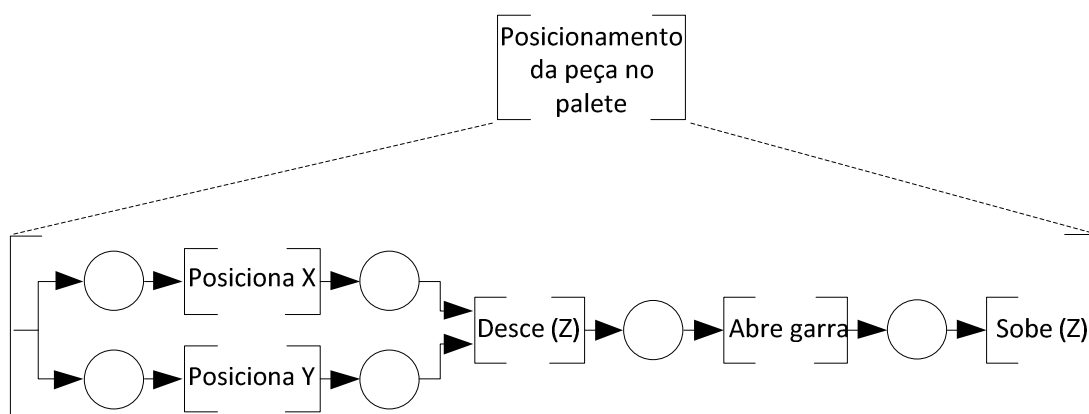
Liberada a peça pelo Módulo de Travamento, a Garra Dedicada é fechada, acoplando-se à peça e sendo elevada ao longo da Guia Z (Figura 38).



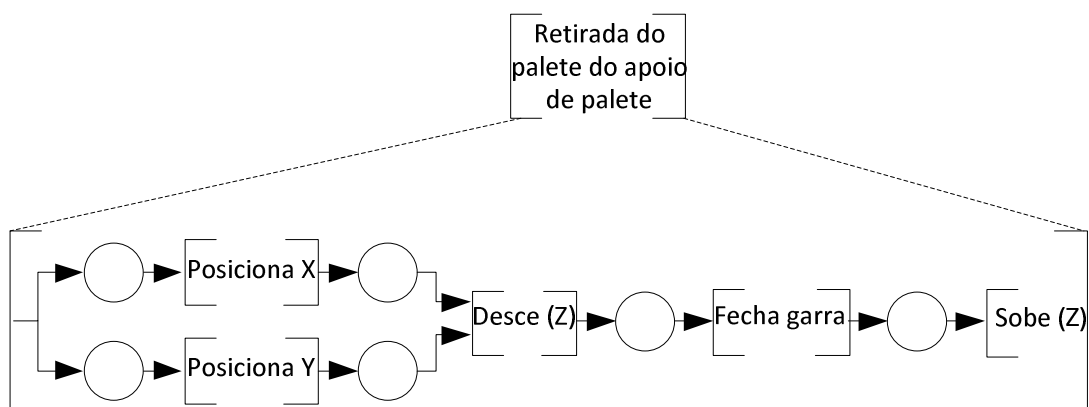
**Figura 38. Retirada da peça do Módulo de Travamento**

Para posicionamento da peça pronta no palete, a garra acoplada à peça é posicionada sobre o palete, no encaixe de peças e então aberta. Posicionada a peça no palete, a Garra Dedicada é então elevada ao longo da Guia Z (Figura 39).

A Garra Dedicada neste momento é posicionada sobre o palete, diretamente sobre a região destinada ao encaixe da garra. A garra é então fechada sendo acoplada ao palete. Estando acoplada ao palete, a Garra Dedicada é elevada ao longo da Guia Z (Figura 40).

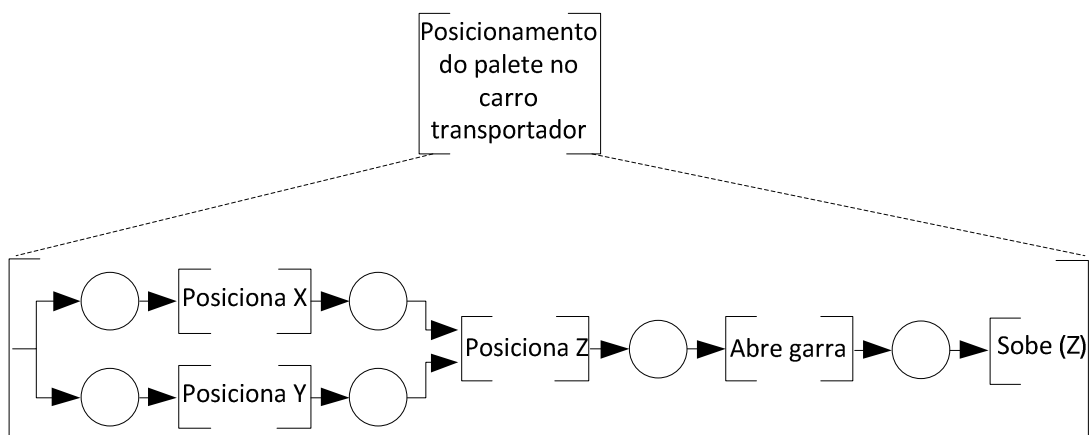


**Figura 39. Posicionamento da peça no palete**



**Figura 40. Retirada do paleta do Apoio de Paleta**

Finalmente a Garra Dedicada é posicionada sobre o Carro Transportador, desce ao longo da Guia Z e se abre, encaixando o paleta novamente no Carro Transportador e sobe ao longo da Guia Z, finalizando assim o processo de montagem (Figura 41).



**Figura 41. Posicionamento do paleta no Carro Transportador e final da montagem**



#### 4.8 Definição e alocação dos sinais de entrada e saída

Após modelagem com dois níveis de detalhamento em PFS, serão agora apresentadas as principais funções em Rede de Petri que já representam um detalhamento em nível de sinais de entrada e saída, ou seja, uma abordagem que ilustra a interação entre atuadores, sensores e controladores. No última etapa (item 4.9) será feita a simulação do modelo no *software* HPSim e dessa forma será estruturado o programa de controle.

#### Modelagem em Rede de Petri e Simulação

##### *Disponibilização de molas:*

A Figura 42 ilustra o modelo em RdP para a operação: Recua pistão do Magazine de Molas. A Tabela 2 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

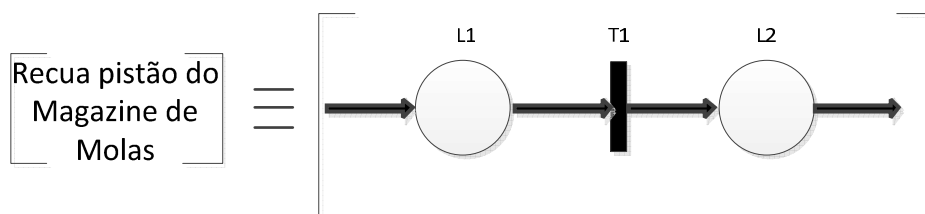
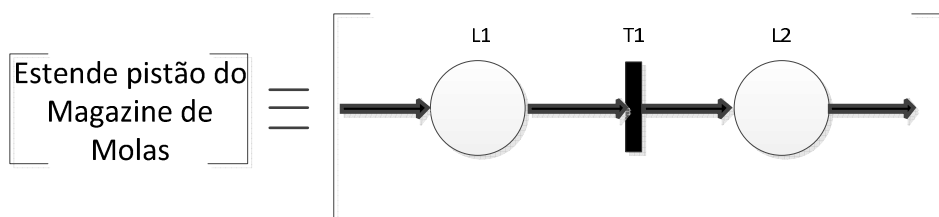


Figura 42. Modelo em RdP para recuo do cilindro do Magazine de Molas

Tabela 2. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de recuo do pistão do Magazine de Molas

Lugar	Descrição
L1	Comando para recuar o pistão do Magazine de Molas
L2	Pistão do Magazine de Molas recuado
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do sensor posição correta do pistão

A Figura 43 ilustra o modelo em RdP para a operação: Estende pistão do Magazine de Molas. A Tabela 3 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.



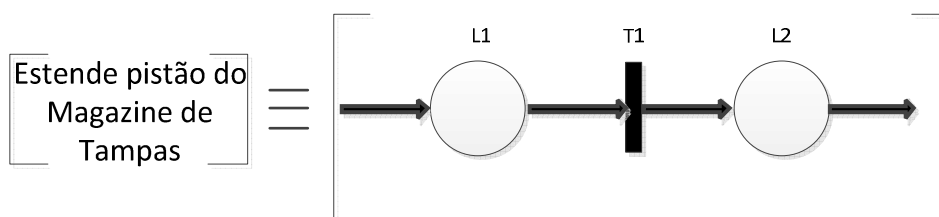
**Figura 43. Modelo em RdP para avanço do cilindro do Magazine de Molas**

**Tabela 3. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de avanço do pistão do Magazine de Molas**

Lugar	Descrição
L1	Comando para avançar o pistão do Magazine de Molas
L2	Pistão do Magazine de Molas avançado
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do sensor posição correta do pistão

### **Disponibilização de Tampas:**

A Figura 44 ilustra o modelo em RdP para a operação: Estende pistão do Magazine de Tampas. A Tabela 4 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.



**Figura 44. Modelo em RdP para avanço do pistão do Magazine de Tampas**

**Tabela 4. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de avanço do pistão do Magazine de Tampas**

Lugar	Descrição
L1	Comando para estender o pistão do Magazine de Tampas
L2	Pistão do Magazine de Tampas estendido
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do sensor posição correta do pistão

A Figura 45 ilustra o modelo em RdP para a operação: Recua pistão do Magazine de Tampas. A Tabela 5 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

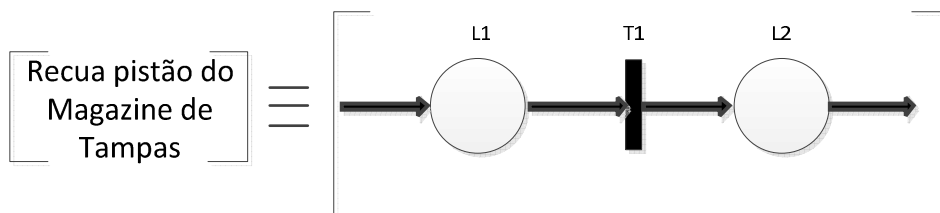


Figura 45. Modelo em RdP para recuo do pistão do Magazine de Tampas

Tabela 5. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de recuo do pistão do Magazine de Tampas

Lugar	Descrição
L1	Comando para recuar o pistão do Magazine de Tampas
L2	Pistão do Magazine de Tampas recuado
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do sensor posição correta do pistão

### **Disponibilização de pinos:**

A Figura 46 ilustra o modelo em RdP para a operação: Gira encaixe de pino no sentido horário. A Tabela 6 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

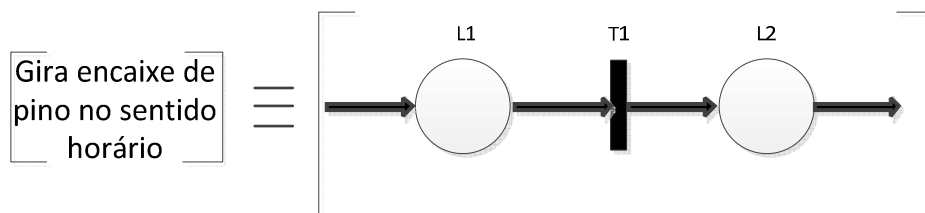
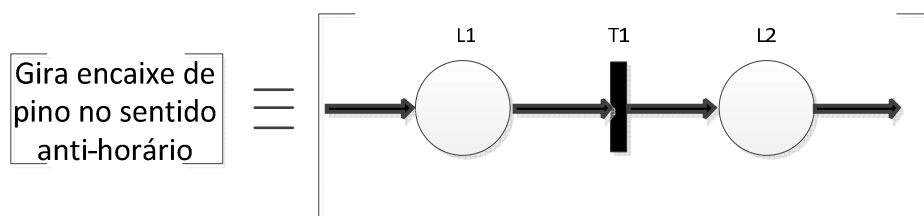


Figura 46. Modelo em RdP para giro do Encaixe de Pino no sentido horário

**Tabela 6. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de giro do Encaixe de Pino no sentido horário**

Lugar	Descrição
L1	Comando para girar Encaixe de Pino no sentido horário
L2	Encaixe de Pino na posição desejada
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do sensor quanto à posição correta do Encaixe de Pino

A Figura 47 ilustra o modelo em RdP para a operação: Gira encaixe de pino no sentido anti-horário. A Tabela 7 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.



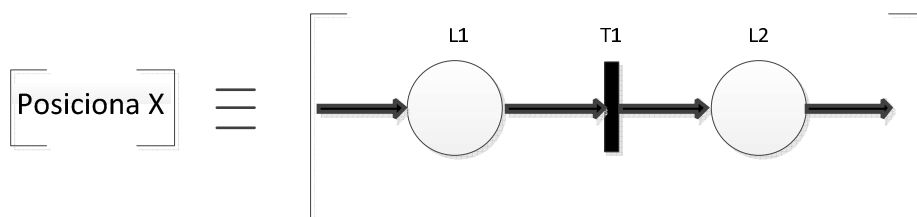
**Figura 47. Modelo em RdP para giro do Encaixe de Pino no sentido anti-horário**

**Tabela 7. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de giro do Encaixe de Pino no sentido anti-horário**

Lugar	Descrição
L1	Comando para girar Encaixe de Pino no sentido anti-horário
L2	Encaixe de Pino na posição desejada
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do sensor quanto à posição correta do Encaixe de Pino

### ***Posicionamento da Garra Dedicada nos eixos X, Y e Z:***

A Figura 48 ilustra o modelo em RdP para a operação: Posiciona X. A Tabela 8 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

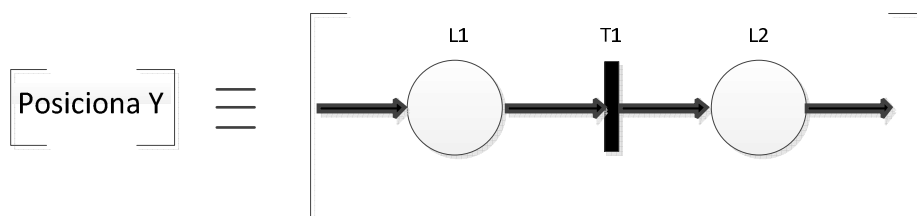


**Figura 48. Modelo em RdP para posicionamento da Guia em X**

**Tabela 8. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de movimentação da Garra Dedicada através do eixo X**

Lugar	Descrição
L1	Comando para deslocar a Guia em X
L2	Guia na posição X desejada
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do <i>encoder</i> quanto à posição correta da peça

A Figura 49 ilustra o modelo em RdP para a operação: Posiciona Y. A Tabela 9 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.



**Figura 49. Modelo em RdP para posicionamento da Guia em Y**

**Tabela 9. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de movimentação da Garra Dedicada através do eixo Y**

Lugar	Descrição
L1	Comando para deslocar a Guia em Y
L2	Guia na posição Y desejada
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do <i>encoder</i> quanto à posição correta da peça

A Figura 50 ilustra o modelo em RdP para a operação: Sobe (Z). A Tabela 10 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

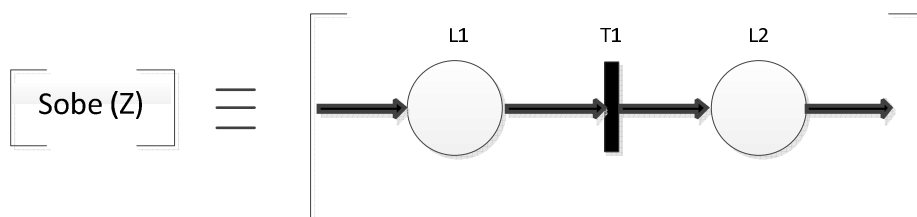


Figura 50. Modelo em RdP para subida da Garra Dedicada pela Guia Z

Tabela 10. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de subida da Garra Dedicada da Guia Z

Lugar	Descrição
L1	Comando para subir a Garra Dedicada pela Guia Z
L2	Garra Dedicada na posição Z desejada
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do sensor quanto à posição correta da peça

A Figura 51 ilustra o modelo em RdP para a operação: Desce Z. A Tabela 11 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

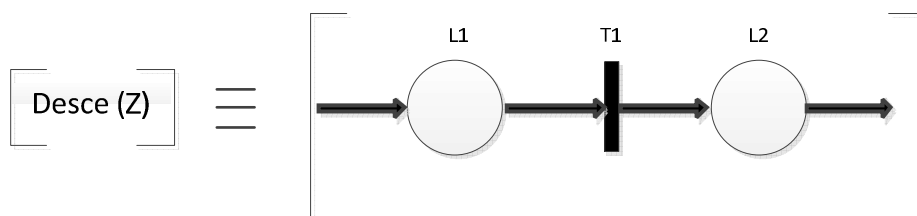
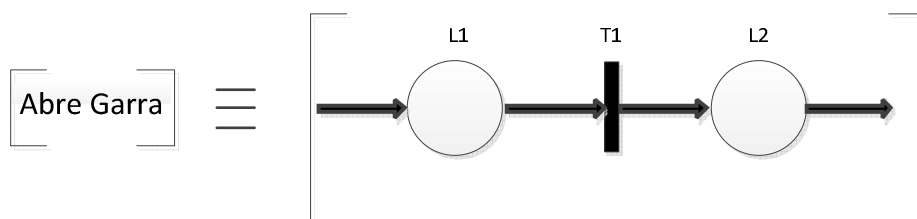


Figura 51. Modelo em RdP para descida da Garra Dedicada pela Guia Z

Tabela 11. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de descida da Garra Dedicada da Guia Z

Lugar	Descrição
L1	Comando para descer a Garra Dedicada pela Guia Z
L2	Garra Dedicada na posição Z desejada
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento da informação do sensor quanto à posição correta da peça

A Figura 52 ilustra o modelo em RdP para a operação: Abre Garra . A Tabela 12 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

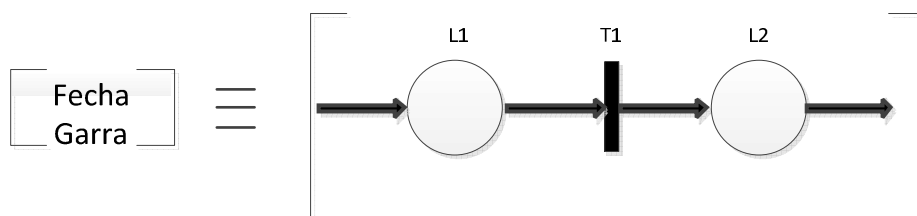


**Figura 52. Abertura da Garra Dedicada**

**Tabela 12. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de abertura da Garra Dedicada**

Lugar	Descrição
L1	Comando para abertura da Garra Dedicada
L2	Garra Dedicada aberta
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento das informações do sensor de abertura e fechamento da garra

A Figura 53 ilustra o modelo em RdP para a operação: Fecha Garra. A Tabela 13 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.



**Figura 53. Fechamento da Garra Dedicada**

**Tabela 13. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de fechamento da Garra Dedicada**

Lugar	Descrição
L1	Comando para Fechamento da Garra Dedicada
L2	Garra Dedicada fechada
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento das informações do sensor de abertura e fechamento da garra

A Figura 54 ilustra o modelo em RdP para a operação: Gira Garra em 270° no sentido horário. A Tabela 14 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

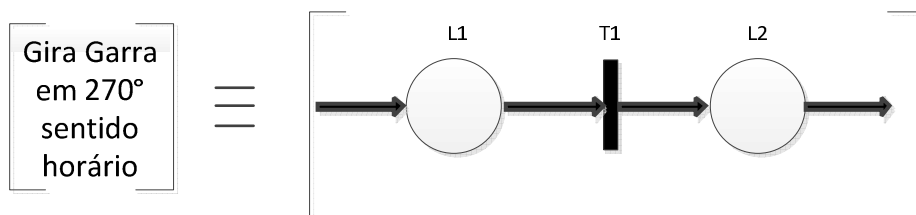


Figura 54. Giro da Garra Dedicada de 270° no sentido horário

Tabela 14. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de giro da Garra Dedicada no sentido horário

Lugar	Descrição
L1	Comando giro da Garra Dedicada em 270° sentido horário
L2	Garra Dedicada na posição desejada ("girada")
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento das informações do sensor rotação da Garra Dedicada

A Figura 55 ilustra o modelo em RdP para a operação: Gira Garra em 270° no sentido anti-horário. A Tabela 15 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.

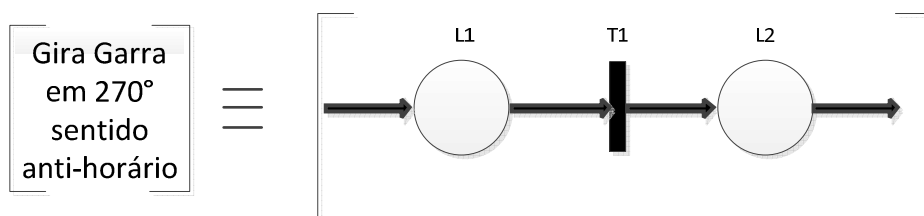


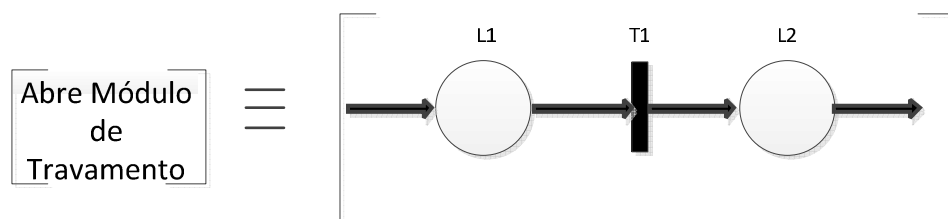
Figura 55. Giro da Garra Dedicada de 270° no sentido anti-horário

Tabela 15. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de giro da Garra Dedicada no sentido anti-horário

Lugar	Descrição
L1	Comando giro da Garra Dedicada em 270° sentido anti-horário
L2	Garra Dedicada na posição desejada ("girada")
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento das informações do sensor rotação da Garra Dedicada

A Figura 56 ilustra o modelo em RdP para a operação: Abre Módulo de Travamento. A Tabela 16 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.



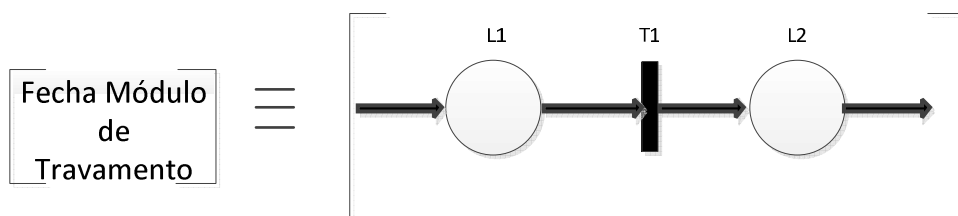


**Figura 56. Abertura do Módulo de Travamento**

**Tabela 16. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de abertura do Módulo de Travamento**

Lugar	Descrição
L1	Abertura do Módulo de Travamento
L2	Módulo de Travamento aberto
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento das informações do sensor de abertura e fechamento do Módulo de Travamento

A Figura 57 ilustra o modelo em RdP para a operação: Fecha do Módulo de Travamento. A Tabela 17 indica o detalhamento dos **lugares** e **transições** envolvidas no processo.



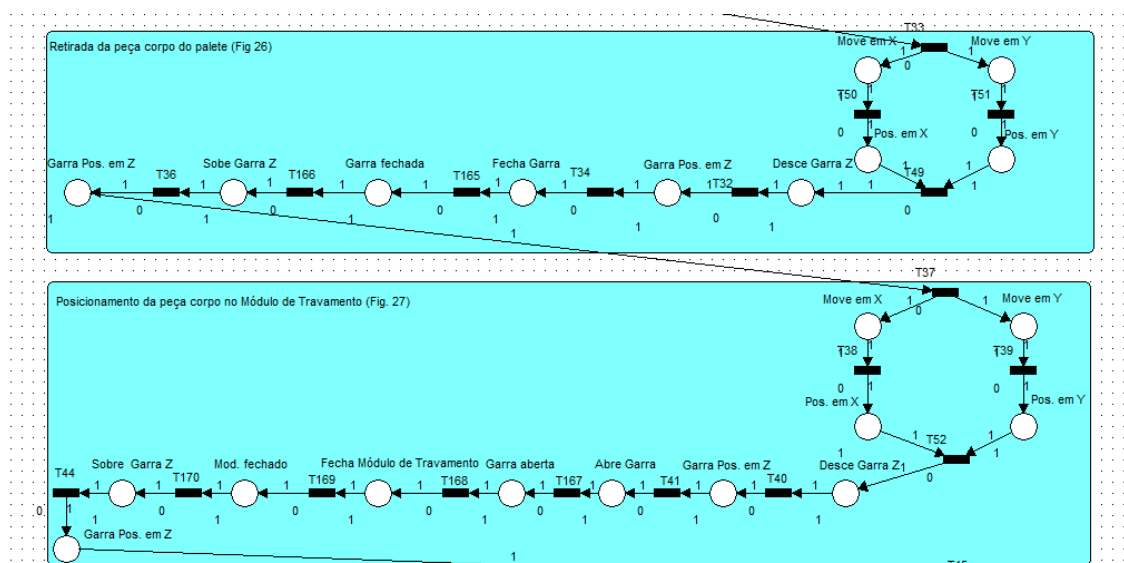
**Figura 57. Fechamento do Módulo de Travamento**

**Tabela 17. Detalhamento dos lugares e transições envolvidos no processo de fechamento do Módulo de Travamento**

Lugar	Descrição
L1	Fechamento do Módulo de Travamento
L2	Módulo de Travamento fechado
Transição	Descrição
T1	Transição requisitante que representa o recebimento das informações do sensor de abertura e fechamento do Módulo de Travamento







**Figura 60. Lugares e transições que indicam reutilização de algumas funções de controle no modelo (2)**

Devido à boa organização da estrutura do modelo, dividida em blocos, foi possível obter um modelo bastante organizado, de tal forma que não foram encontrados *Deadlocks* ou falhas na simulação.

## 5. Conclusão

Para sistemas a eventos discretos com complexidade relativamente baixa, a necessidade de se seguir uma metodologia de projeto para modelagem e simulação da Lógica de Controle envolvida antes da mesma ser transposta para o Controlador pode não ser crucial. Contudo, à medida que a complexidade dos sistemas aumenta, essa sistemática de projeto se mostra primordial para prevenção de erros conceituais de lógica e *Deadlocks*. A Metodologia de Projeto proposta por Miyagi (1996) se mostra uma ferramenta poderosa para a estruturação de soluções para projetos de *Software* de Controle.

Este trabalho apresentou uma aplicação no projeto da Lógica de Controle para tais *softwares*, abordando três níveis de detalhamento. O primeiro nível (PFS) definiu uma estrutura macro, detalhando cada etapa macro do controle da Estação de Montagem. O segundo nível (PFS) aborda um detalhamento de cada etapa macro dessa lógica em nível de funções básicas de controle necessárias para realização das atividades listadas no primeiro nível de modelagem.

O nível mais detalhado (Rede de Petri) fornece uma abordagem em nível de sinais de entrada e saída de sensores e atuadores, de forma que tal modelo possa ser transposto para o *software* de simulação HPSim e, a lógica em si, pudesse ser simulada e analisada. Este é o último passo antes de tal lógica ser programada e implementada em um ou mais controladores de lógicos programáveis (CLPs).

Na modelagem, foi feita toda a estruturação do modelo, dividido em blocos de cores distintas, para facilitação da compreensão, e cada bloco corresponde a uma atividade listada no modelo de menor nível de detalhamento em PFS. Os blocos apresentam funções e operações que se repetem, facilitando a estruturação do programa.

A simulação permitiu que toda a Lógica fosse testada e validada, diminuindo assim a possibilidade de ocorrência de erros numa posterior implementação dessa lógica no controlador. Pelo fato de toda a modelagem ter sido feita com três níveis de detalhamento, com funções de controle bem

definidas e que se repetem por vezes, a simulação não apresentou nenhum *Deadlock* ou quaisquer problemas.

## Referências Bibliográficas

- ÁLVARES, A. J., SOUSA, A. I., Telemanufatura: Teleoperação via web de uma máquina de oxi-corte CNC, Disponível em: <[http://moscoso.org/pub/info/books /graco.unb.br/jatlite/papers\\_graco/cidim2001\\_weboxicorte.pdf](http://moscoso.org/pub/info/books/graco.unb.br/jatlite/papers_graco/cidim2001_weboxicorte.pdf)>2001>. Acesso em: 17 de maio de 2009.
- BELL, D., CESARE, S., IACOVELLI, N., LYCETT, M., MERICO, A., *A framework for deriving semantic web services*. In: **Springer Science and Business Media online**, LLC 2006.
- CERAMI, E., ***Web Services Essentials***. Publisher: O`Reilly, First Edition, 2002.
- JUNQUEIRA, F., **Modelagem de sistemas flexíveis de movimentação de Materiais através de Redes de Petri**, Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- JUNQUEIRA, F., **Modelagem e Simulação distribuída de sistemas produtivos**, Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- JUNQUEIRA, F., MIYAGI, P. E., Modelagem e Simulação Distribuída de Sistema Produtivo Baseados em Rede de Petri, **Revista Controle & Automação**, Vol. 20, No 01, Janeiro, Fevereiro e Março 2009.
- KANEKO, A. L., **Desenvolvimento de uma interface gráfica para supervisão de um sistema produtivo teleoperado**, Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- LING, Z., CHEN, W., YU, J., Research and Implementation of OPC Server Based on Data Access Specification, **Apresentado no 5º Congresso Mundial de Controle e Automação Inteligente**, Hangzhou, P.R. China, Junho de 2004. Disponível em <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=1340887](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1340887)>
- MAIA, C., MENDES, R., LÜDERS, R., HARDOUIN, L., Estratégias de Controle por Modelo de Referência de Sistemas a Eventos Discretos Max-Plus Lineares, **Revista Controle & Automação**, Vol. 16 No. 3, Julho, Agosto e Setembro 2005.

- MALEK, L. A., WOLF, C., GUYOT, P. D., *Telemufacturing: A Flexible Manufacturing Solution*, In **International Journal of Production Economics**, 1998, ISSN: 0925-5273.
- MIYAGI, P. E., **Controle Programável**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1996.
- PINTO, P. H., Funcionamento de um Controlador Lógico Programável. **Controle de Contaminação**, No 110, Junho 2008.
- RIBEIRO CURY, J. E., Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos, **V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, Canela RS, Novembro de 2001. Disponível em <<http://www.das.ufsc.br/~cury/cursos/apostila.pdf>>.
- SILVA FILHO, A. M., A Era da Informação, **Revista Espaço Acadêmico**, Ano 1, No 02, Julho 2001 ISSN 1519.6186.