

DAVID LIRA NUÑEZ

DETECÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS FLEXÍVEIS DE
MONTAGEM ATRAVÉS DE REDE DE PETRI.

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

São Paulo
2006

DAVID LIRA NUÑEZ

**DETECÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS FLEXÍVEIS DE
MONTAGEM ATRAVÉS DE REDE DE PETRI.**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e Automação
Mecânica.

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo
2006

A minha esposa Aliandra, meu pai Efrain, minha mãe Emma, que está no céu, minha segunda mãe Gabriela e aos meus irmãos Efrain, Pamela, Jose Gabriel (Pepe), Rodrigo e Maria del Carmen.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi pela efetiva orientação e grande incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas da sala MC-01 pelas sugestões, contribuições e amizade – em especial à Gladys, ao Roger, ao Fabrício, à Emilia, ao Percy e ao Luis.

Aos meus conterrâneos Carlos, Giancarlo, Paul, Luis, Cristian, Fernando, Juan, Mario, Alex e em especial ao Jimmy que ajudaram a esquecer as dificuldades que acontecem pelo fato de estar longe da nossa terra, Peru.

Aos meus amigos brasileiros Evandro, Sandro, Patrick, Rondinelli, Antonio, Fabio, João, Daniel, Erika, Mishene, Paulinha, Roberta, e outros, que me ensinaram os costumes e as riquezas deste lindo país.

À escola politécnica da USP, ao Departamento de engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos e ao ITBA (Instituto Tecnológico Brasil-Alemanha), que institucionalmente viabilizaram este trabalho.

À FAPESP pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Uma parte significativa das atividades num sistema de manufatura envolve tarefas de montagem. Atualmente, estas tarefas são objeto de automatização devido à crescente demanda do mercado em relação à qualidade, produtividade e à variedade de produtos. Por conseguinte, a automatização dos sistemas de montagem deve ser flexível para poder enfrentar a diversificação, funcionalidades, tempos de entrega e volumes envolvidos nos produtos. Entretanto, estes sistemas são vulneráveis a falhas devido às características dos seus mecanismos e à interação complexa entre seus dispositivos de controle. Neste contexto, o presente trabalho está focalizado no projeto de modelagem do controle de Sistemas Flexíveis de Montagem, considerando a ocorrência de falhas. Assim, o método proposto estrutura etapas para o desenvolvimento dos modelos dos processos de montagem para sua detecção de falhas, baseado na teoria de Sistemas a Eventos Discretos e rede de Petri. Este trabalho utiliza em particular a técnica PFS/MFG (*Production Flow Schema/Mark Flow Graph*) para descrever e modelar o controle de Sistemas Flexíveis de Montagem através de um procedimento racional e sistemático, assim como, técnicas quantitativas baseadas nos dados do processo para a detecção de falhas. Esta abordagem é aplicada num Sistema Flexível de Montagem instalado e em operação para comparar a eficácia do procedimento desenvolvido.

ABSTRACT

A significant part of the activities in a manufacturing system involve assembly tasks. Nowadays, these tasks are object of automation due to the market increasing demand for quality, productivity and variety of the products. Consequently, the automation of assembly systems should consider flexibility to face product diversification, functionalities, delivery times, and volumes involved. However, these systems are vulnerable to faults due to the characteristic of their mechanism and the complex interaction among their control devices. In this context, the present work is focused on the modeling design of Flexible Assembly Systems control, including the occurrence of faults. The proposed method structures a sequence of steps for the models construction of assembly processes and their fault detection, based on the theory of Discrete Events Systems and Petri net. This work use in special, Production Flow Schema/Mark Flow Graph (PFS/MFG) technique to describe and model the Flexible Assembly Systems control through a rational and systematic procedure, as well as, the processes data record based on quantitative techniques for fault detection. This approach is applied to a Flexible Assembly Systems installed and in operation to compare the effectiveness of the developed procedure.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização do texto.....	3
2. SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MONTAGEM (FAS)	5
a. Flexibilidade de processo.....	7
b. Flexibilidade de roteiro	8
c. Flexibilidade de produto	8
d. Flexibilidade de volume.....	8
e. Flexibilidade de montagem.....	8
2.1. Sistemas a Eventos Discretos (SED).....	9
2.2. Modelagem de um FAS	10
2.3. Ameaças para o bom funcionamento de FAS.....	13
2.3.1. Falha.....	14
2.3.2. Defeito.....	17
2.3.3. Erro.....	18
2.4. Taxa de ocorrência de falhas num FAS	20
2.5. Detecção de falhas num FAS	22
2.5.1. Técnicas baseadas no modelo do processo	23
2.5.2. Técnicas baseadas na história do processo.....	25
3. REDE DE PETRI (PN).....	28
3.1. Conceitos básicos da PN Condição - Evento	29
3.2. Regras de execução da PN condição-evento.....	31
3.3. Propriedades da PN	32
• Alcançabilidade.....	33
• Vivacidade	33
• Reversibilidade.....	34
3.4. Análise da PN.....	34
a. Equação de Estado	34
b. Análise da PN por simulação.....	36
3.5. Subclasses da PN	37
3.5.1. Técnica PFS/MFG.....	38
a. PFS - <i>Production Flow Schema</i>	39
b. MFG - <i>Mark Flow Graph</i>	43
4. MÉTODO DE MODELAGEM PARA DETECÇÃO DE FALHAS	47
4.1. Conceitos abordagem.....	47
4.2. Principais etapas do método.....	50
4.2.1. Identificação das funções do sistema flexível de montagem	51
1) Primeiro passo.....	51
2) Segundo passo:.....	51
3) Terceiro passo:	53
4.2.2. Integração dos dispositivos do sistema flexível de montagem	56
4.2.3. Detecção de falhas no sistema flexível de montagem.....	59

a) Passo a: indução de falhas.....	59
b) Passo b: comparação de dados e detecção de falhas	60
5. EXEMPLO APLICATIVO.....	63
5.1. Identificação dos componentes do sistema flexível de montagem	63
1) Primeiro passo: descrição do sistema flexível de montagem.....	63
2) Segundo passo: análise das funções.....	73
3) Terceiro passo: fluxo de produção do sistema	76
4) Quarto passo: listagem dos dispositivos	79
5.2. Interação dos dispositivos do sistema flexível de montagem	83
5.3. Detecção de falhas do sistema flexível de montagem.....	85
6. CONCLUSÕES	89
ANEXO A.....	91
A.1. Códigos usados IEC 61346-2:2000-12	91
A.2. Diferenças entre HPSim e MFG	91
A.3. Deslocamento do braço robótico nos eixos X e Y	92
ANEXO B	93
B.1. Análise das funções do FAS.....	93
B.2. Fluxo de produção do FAS em PFS	107
B.3. Listagem dos dispositivos	119
B.4. Integração dos dispositivos: dinâmica do FAS em MFG	128
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fatores da flexibilidade de um sistema de montagem (CEBALLOS, 1992).	7
Figura 2.2. Estrutura do sistema de controle para SED (adaptado de MIYAGI, 1996). 11	
Figura 2.3. Hierarquia de um FAS	12
Figura 2.4. Classificação das falhas elementares (AVIZIENIS et al., 2004).	15
Figura 2.5. Árvore das classes de combinações de falhas.....	16
Figura 2.6. Modos de defeito (AVIZIENIS et al., 2004).	18
Figura 2.7. Propagação do erro (adaptado de AVIZIENIS et al., 2004).	19
Figura 2.8. Padrões da ocorrência de falhas num sistema.....	21
Figura 2.9. Classificação das técnicas de detecção de falhas (DASH et al., 2000). ..	23
Figura 3.1. Disparo da TRANSIÇÃO t_3	32
Figura 3.2. Grafo de uma PN	35
Figura 3.3. Grafo de uma PN com M_f	36
Figura 3.4. Elementos estruturais do PFS	40
Figura 3.5. Perguntas para construção da árvore de funções.	42
Figura 3.6. Identificação dos elementos estruturais do MFG.	43
Figura 3.7. TRANSIÇÕES em conflito.	45
Figura 3.8. Prioridade de disparo com portas habilitadoras e inibidoras.	46
Figura 4.1. Escopo do método proposto de modelagem do sistema.	48
Figura 4.2. Classificação dos tipos de falha num FAS	49
Figura 4.3. Taxa de ocorrência de falhas no FAS considerado.....	50
Figura 4.4. Método de modelagem da detecção de falhas em FAS.	51
Figura 4.5. Análise das funções.	53
Figura 4.6. Características da interação entre atividades em PFS.....	54
Figura 4.7. PFS/MFG do nível dispositivo.	54
Figura 4.8. Nomenclatura usada.....	55
Figura 4.9. Nomenclatura usada.....	57
Figura 4.10. Detalhe do módulo atuador.....	57
Figura 4.11. Interação das tarefas do sistema flexível de montagem.....	58
Figura 4.12. Exemplo da comparação dos dados com falhas.	60

Figura 4.13. Hipótese do sensor com falha.....	61
Figura 4.14. Detecção e diagnóstico de falhas no FAS.....	62
Figura 5.1. Sistema flexível de montagem integrado por computador.....	63
Figura 5.2. Peças a serem montadas.....	64
Figura 5.3. Diagrama esquemático da estação de alimentação.....	66
Figura 5.4. componentes da geração de vácuo.....	66
Figura 5.5. Sensores de teste da peça “corpo”.....	67
Figura 5.6. Sensor de medida.....	68
Figura 5.7. Equipamento elevador.....	68
Figura 5.8. Componentes do dispositivo robô.....	69
Figura 5.9. Posições do braço robótico no eixo Z e posições da garra.....	70
Figura 5.10 Estação de montagem (As).....	71
Figura 5.11. equipamentos da estação de montagem.....	72
Figura 5.12. Fluxo de material entre as células.....	72
Figura 5.13 Hierarquia do sistema flexível de montagem.....	73
Figura 5.14. Diagrama das funções do sistema flexível de montagem.....	75
Figura 5.15. Diagrama das funções que compõem a função “fixar peça tampa na peça corpo”.....	75
Figura 5.16. PFS do sistema flexível de montagem.....	76
Figura 5.17. PFS das células de produção do Sistema Flexível de montagem.....	77
Figura 5.18. Detalhamento em PFS da célula de montagem (A).....	77
Figura 5.19. Detalhamento em PFS das operações do braço robótico.....	78
Figura 5.20. Detalhamento em PFS da operação fixar “tampa”.....	79
Figura 5.21. Interação dos dispositivos para fixar “tampa”.....	84
Figura 5.22. Comparação dos dados nominais com os induzidos a falha.....	87
Figura A.1. Comparação de ARCOS do HPSim com o MFG.....	91
Figura A.2. Deslocamento do braço robótico em X e Y.....	92
Figura B.1. Diagrama das funções do FAS.....	93
Figura B.2. Diagrama das funções do início do processo.....	94
Figura B.3. Diagrama das funções do início do processo.....	95
Figura B.4. Diagrama das funções da estação de alimentação (Su).....	96
Figura B.5. Diagrama das funções da estação de teste (Te).....	97

Figura B.6. Diagrama das funções do braço robótico pegando <i>pallet</i> da esteira.	98
Figura B.7. Diagrama das funções do braço robótico transportando <i>pallet</i>	98
Figura B.8. Diagrama das funções do braço robótico pegando peça “corpo”.	99
Figura B.9. Diagrama das funções do braço robótico transporta peça “corpo”.	99
Figura B.10. Diagrama das funções do braço robótico pegando “êmbolo”.	100
Figura B.11. Diagrama das funções do braço robótico montando “êmbolo”.	101
Figura B.12. Diagrama das funções do braço robótico pegando “mola”.	102
Figura B.13. Diagrama das funções do braço robótico montando “mola”.	102
Figura B.14. Diagrama das funções do braço robótico pegando “tampa”.	103
Figura B.15. Diagrama das funções do braço robótico fixando “tampa”.	103
Figura B.16. Diagrama das funções do braço robótico transporta peça montada.	104
Figura B.17. Diagrama das funções do braço robótico pegando <i>pallet</i>	104
Figura B.18. Diagrama das funções do braço robótico transportando <i>pallet</i>	105
Figura B.19. Diagrama das funções da estação de montagem (As).	105
Figura B.20. Diagrama das funções do sistema de transporte (T)	106
Figura B.21. PFS do FAS.	107
Figura B.22. PFS das células de produção do FAS.	107
Figura B.23. Detalhamento em PFS da etapa iniciar processo	108
Figura B.24. Detalhamento em PFS da etapa setup da energia elétrica.	108
Figura B.25. Detalhamento em PFS da etapa setup energia pneumática.	108
Figura B.26. Detalhamento em PFS da etapa verificar ar.	108
Figura B.27. Detalhamento em PFS da etapa setup painel de controle	109
Figura B.28. Detalhamento em PFS do modo automático.	109
Figura B.29. Detalhamento em PFS do modo manual.	109
Figura B.30. Detalhamento em PFS da etapa setup processo	109
Figura B.31. Detalhamento em PFS das condições iniciais dos atuadores.	109
Figura B.32. Detalhamento em PFS do sistema supervisorio.	110
Figura B.33. Detalhamento em PFS dos depósitos	110
Figura B.34. Detalhamento em PFS dos depósitos da estação (As)	110
Figura B.35. Detalhamento em PFS da célula (I).	110
Figura B.36. Detalhamento em PFS da estação (Su)	111
Figura B.37. Detalhamento em PFS da estação (Su)	111

Figura B.38. Detalhamento em PFS da estação (Su)	111
Figura B.39. Detalhamento em PFS da estação (Te)	111
Figura B.40. Detalhamento em PFS da estação (Te)	112
Figura B.41. Detalhamento em PFS da estação (Te)	112
Figura B.42. Detalhamento em PFS da célula (A).....	112
Figura B.43. Detalhamento em PFS da estação (Ro).....	113
Figura B.44. Detalhamento em PFS do robô pegando <i>pallet</i>	113
Figura B.45. Detalhamento em PFS do robô transportando <i>pallet</i>	113
Figura B.46. Detalhamento em PFS do robô pegando peça “corpo”	114
Figura B.47. Detalhamento em PFS do robô transportando peça “corpo”.	114
Figura B.48. Detalhamento em PFS do robô pegando “êmbolo”	114
Figura B.49. Detalhamento em PFS do robô montando “êmbolo”.....	114
Figura B.50. Detalhamento em PFS do robô pegando “mola”	114
Figura B.51. Detalhamento em PFS do robô montando “mola”.....	114
Figura B.52. Detalhamento em PFS do robô pegando “tampa”.	115
Figura B.53. Detalhamento em PFS do robô fixando “tampa”.....	115
Figura B.54. Detalhamento em PFS do robô transportando peça montada.	115
Figura B.55. Detalhamento em PFS do robô pega <i>pallet</i>	115
Figura B.56. Detalhamento em PFS do robô transportando <i>pallet</i>	115
Figura B.57. Detalhamento em PFS da estação (As).....	115
Figura B.58. Detalhamento em PFS do depósito de êmbolos.....	116
Figura B.59. Detalhamento em PFS do depósito de molas.....	116
Figura B.60. Detalhamento em PFS do depósito de tampas.....	116
Figura B.61. Detalhamento em PFS do sistema de transporte (T).....	117
Figura B.62. Detalhamento em PFS da recepção de <i>pallets</i>	117
Figura B.63. Detalhamento em PFS da identificação do <i>pallet</i>	117
Figura B.64. Detalhamento em PFS do <i>pallet</i> carregando/descarregando peças.....	117
Figura B.65. Detalhamento em PFS da liberação do <i>pallet</i>	118
Figura B.66. Integração dos dispositivos da estação (Su).....	128
Figura B.67. Integração dos dispositivos da estação (Te).....	129
Figura B.68. Integração dos dispositivos do robô para pegar <i>pallet</i>	130
Figura B.69. Integração dos dispositivos do robô para transportar <i>pallet</i>	131

Figura B.70. Integração dos dispositivos do robô para pegar peça “corpo”	132
Figura B.71. Integração dos dispositivos do robô para transportar peça “corpo”....	133
Figura B.72. Integração dos dispositivos do robô para pegar “êmbolo”	134
Figura B.74. Integração dos dispositivos do robô para pegar “mola”	137
Figura B.75. Integração dos dispositivos do robô para montar “mola”	138
Figura B.76. Integração dos dispositivos do robô para pegar “tampa”	139
Figura B.77. Integração dos dispositivos do robô para fixar “tampa”	140
Figura B.78. Integração dos dispositivos do robô para deixar peça montada.....	141
Figura B.79. Integração dos dispositivos do robô para pegar <i>pallet</i>	142
Figura B.80. Integração dos dispositivos do robô para deixa <i>pallet</i>	143
Figura B.81. Integração dos dispositivos do sistema de transporte (T)	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Lista dos dispositivos.	55
Tabela 4.2. Armazenagem da MARCAÇÃO de cada um dos módulos.	58
Tabela 5.1. Posições em X e Y do braço robótico para montagem das peças.	70
Tabela 5.2. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (Ro)....	79
Tabela 5.3. Lista dos dispositivos de atuação da estação (Ro).	79
Tabela 5.4. Lista dos dispositivos de detecção da estação (Ro).....	80
Tabela 5.5. MARCAÇÕES nominais do braço robótico para fixar “tampa”.	85
Tabela 5.6. MARCAÇÃO com falha induzida em 8B2.....	86
Tabela 5.7. MARCAÇÃO com falha induzida em 11B1.....	86
Tabela B.1. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (Su)...	119
Tabela B.2. Lista dos dispositivos de atuação da estação (Su).	119
Tabela B.3. Lista dos dispositivos de detecção da estação (Su).	119
Tabela B.4. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (Te)...	120
Tabela B.5. Lista dos dispositivos de atuação da estação (Te).	120
Tabela B.6. Lista dos dispositivos de detecção da estação (Te).	120
Tabela B.7. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (As). .	121
Tabela B.8. Lista dos dispositivos de atuação da estação (As).....	121
Tabela B.9. Lista dos dispositivos de detecção da estação (As).	121
Tabela B.10. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (Ro)	122
Tabela B.11. Lista dos dispositivos de atuação da estação (Ro).....	122
Tabela B.12. Lista dos dispositivos de detecção da estação (Ro).....	123
Tabela B.13. Lista dos objetos de controle do sistema de transporte (T)	125
Tabela B.14. Lista dos dispositivos de atuação do sistema de transporte (T).....	126
Tabela B.15. Lista dos dispositivos de detecção do sistema de transporte (T).....	127
Tabela B.16. MARCAÇÃO da estação (Su).....	128
Tabela B.17. MARCAÇÃO da estação (Te).....	129
Tabela B.18. MARCAÇÃO – braço robótico pega <i>pallet</i> da esteira.....	130
Tabela B.19. MARCAÇÃO – braço robótico deixa <i>pallet</i> no dispositivo de fixação	
131	
Tabela B.20. MARCAÇÃO – braço robótico pega peça “corpo” do <i>pallet</i>	132

Tabela B.21. MARCAÇÃO – braço robótico deixa peça “corpo” no dispositivo de retenção	133
Tabela B.22. MARCAÇÃO – braço robótico agarra “êmbolo”	134
Tabela B.23. MARCAÇÃO – braço robótico monta “êmbolo” na peça “corpo”	136
Tabela B.24. MARCAÇÃO – braço robótico agarra “mola”	137
Tabela B.25. MARCAÇÃO – braço robótico monta “mola” na peça “corpo”	138
Tabela B.26. MARCAÇÃO – braço robótico pega “tampa”	139
Tabela B.27. MARCAÇÃO – braço robótico fixa “tampa” na peça “corpo”	140
Tabela B.28. MARCAÇÃO – braço robótico deixa peça montada no <i>pallet</i>	141
Tabela B.29. MARCAÇÃO – braço robótico pega <i>pallet</i> do dispositivo de fixação	142
Tabela B.30. MARCAÇÃO – braço robótico deixa <i>pallet</i> na esteira	143
Tabela B.31. MARCAÇÃO do sistema de transporte (T)	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANN	- Artificial Neural Networks
DIN	- Deutsches Institut für Normung
FAS	- <i>Flexible Assembly Systems</i> /Sistema Flexível de Montagem
FAST	- Function Analysis System Technique
FMS	- <i>Flexible Manufacturing Systems</i> /Sistemas Flexíveis de Manufatura
IEC	- International Electrotechnical Commission
ISO	- International Organization for Standardization
ITM	- Instituto Tecnológico de Morelia
JIS	- Japan Industrial Standard
MFG	- Mark Flow Graph
PFS	- Production Flow Schema
PN	- <i>Petri net</i> /Rede de Petri
QTA	- Qualitative trend Analysis
SDG	- Signed-Directed-Graph
SED	- Sistemas a Eventos Discretos/ <i>Discrete Event Systems</i>
SFC	- Sequential Flow Chart
SPC	- Statistical Process Control

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - matriz de incidência
- I - função de entrada de uma rede de Petri
- M - MARCAÇÃO de uma rede de Petri
- M_0 - MARCAÇÃO inicial de uma rede de Petri
- M_f - MARCAÇÃO final de uma rede de Petri
- $m(p_i)$ - MARCAÇÃO de um LUGAR específico
- \mathbb{IN} - conjunto dos números naturais
- O - função de saída de uma rede de Petri
- P - conjunto de LUGARES de uma rede de Petri
- p_i - LUGAR "i" qualquer de uma rede de Petri
- T - conjunto de TRANSIÇÕES de uma rede de Petri
- t_j - TRANSIÇÃO "j" qualquer de uma rede de Petri
- u - vetor de disparo de uma rede de Petri

1. INTRODUÇÃO

Falhas são eventos que não podem ser ignorados num sistema de manufatura real (RIASCOS, 2002). Porém, a maioria das pesquisas e publicações técnicas nesta área consideram somente a representação de processos normais, em especial nas tarefas de montagem (ADAMOU et al.; 1998); (BELLGRAN; JOHANSSON, 1994); (CHETTY; GNANASEKARAN, 1996); (LIU et al.; 1994); (SAWIK, 2004); (THOMAS et al.; 1996a); (THOMAS et al.; 1996b); (ZHA et al.; 2001). Assim, o foco deste trabalho está no desenvolvimento de um método de modelagem e análise, através da simulação, do controle de sistemas de montagem que considera a detecção de falhas nos seus processos. O objetivo é desenvolver uma abordagem adequada para a modelagem do controle destes sistemas é fundamental para assegurar sua flexibilidade e autonomia.

1.1. Justificativa

A gestão dos sistemas de montagem desde sua origem até a atualidade, tem passado por grandes mudanças, explicitadas por dois fatores (BREMER; LENZA, 2000). Um destes fatores foi o grande desenvolvimento tecnológico ocorrido em termos de máquinas, sistemas de informações, automação, robótica, telecomunicações, entre outros, que tornaram possível um planejamento e controle mais eficiente das operações (CLETO, 2002). O outro fator está relacionado às novas formas de organização do trabalho e ao surgimento de novos conceitos de produção e produtividade (CEBALLOS, 1992).

Também, pode-se mencionar que estes sistemas sofrem a necessidade de atender um mercado que se transforma e que expressa sua pressão através da demanda por produtos de menor preço, melhor qualidade e, inclusive de exigências ou especificações únicas e novas, isto é, com caráter inovador e personalizado (CEBALLOS, 1992).

Os sistemas de montagem envolvem de fato outras tarefas além de montagem de partes, isto é, geralmente incluem tarefas de transporte, armazenagem e

empacotamento de partes e/ou produtos. Assim, no contexto anteriormente citado estas tarefas tem sido objeto de automação flexível principalmente em relação à necessidade cada vez maior de assegurar a qualidade e variedade dos produtos (MIYAGI, 1996).

Esta automação das tarefas de montagem deve ser cada vez mais flexível em função das diversificações e funcionalidades dos produtos, assim como dos prazos e volumes de produção envolvidos. Estes sistemas, então, devem atender os requisitos especificados alocando e integrando os diversos sistemas mecânicos, eletrônicos e computacionais que devem estar devidamente organizados para serem capazes de montar vários produtos com diferentes funcionalidades, qualidade e em quantidades devidas (EDMONDSON; REDFORD, 2002).

Assim, os Sistemas Flexíveis de Montagem (FAS) têm-se convertido numa demanda crescente da indústria como resposta a desafios de ciclos de vida curtos, a produtos cada vez mais variados, a mudanças mais rápidas e a lotes de produção cada vez mais complexos (GUEDES et al., 1996).

Sob outro ponto de vista, considerando que estes sistemas apresentam possíveis ocorrências de falhas, é fundamental estabelecer também procedimentos para sua detecção visando desenvolver sistemas mais flexíveis e autônomos. Isto requer, evidentemente, estudo de técnicas que envolvam, além da otimização do controle dos processos de montagem, o processo de detecção de falhas nos mesmos.

Entretanto, observa-se que poucos são os trabalhos que consideram o problema da ocorrência de falhas nestes sistemas. Assim, o presente trabalho discute a implementação de um método que sistematiza a construção de modelos para serem analisados considerando a função da detecção de falhas dos FAS, baseado numa abordagem de Sistemas a Eventos Discretos (SED) e rede de Petri (PN).

1.2. Objetivos

O objetivo do presente trabalho é no presente contexto propor um método¹ para estruturar a construção de modelos que detalhem os processos envolvidos nos FAS para assim permitir a análise do seu sistema de controle. Este método de modelagem, além de facilitar a familiarização com os processos dos FAS, deve também, explorar a aplicação de técnicas de detecção de falhas através de uma abordagem de SED e técnicas derivadas da PN.

1.3. Organização do texto

No capítulo 2 é descrito o Sistema Flexível de Montagem e as considerações necessárias para que este sistema reaja ante eventuais falhas. Também é discutida uma abordagem de FAS através de níveis hierárquicos, adequados para estruturar o método de modelagem e análise que considere a detecção de falhas.

Além disso, são ressaltadas as principais técnicas de detecção de falhas, com especial enfoque nos sistemas industriais, que apoiem o desenvolvimento de um método para a identificação e localização das falhas. O princípio adotado é que esta base permita que trabalhos posteriores possam ser conduzidos em relação ao diagnóstico, tratamento e isolamento de falhas nos FAS.

No capítulo 3 é introduzido o conceito de rede de Petri e uma das suas extensões: a técnica PFS/MFG. Também são definidas algumas das propriedades dos modelos para identificar suas características e seus métodos de análise, dentro do contexto de sistemas industriais.

No capítulo 4 é introduzido um método de modelagem baseado na descrição das funções de FAS e na modelagem destas através da técnica PFS/MFG. A abordagem proposta apóia a caracterização de módulos que representam cada dispositivo de controle dos FAS, para assim, comparar os processos nominais com os processos com falha através da indução das mesmas.

¹ Segundo Villani (2004) a definição de método é um processo disciplinado para geração de um conjunto de modelos que descrevem vários aspectos de um sistema em desenvolvimento, usando notações bem definidas.

Os módulos considerados neste capítulo representam as seguintes características dos FAS:

- os processos de um sistema de montagem quando este opera normalmente,
- os processos de um sistema de montagem quando este opera com falha,
- a execução da detecção de falhas, através da comparação de dados do modelo em operação normal com os dados do modelo em operação com falha,

Além disso, para a construção destes módulos são consideradas abordagens hierárquicas que permitem um procedimento ordenado e coerente da modelagem.

No capítulo 5 é aplicado o método de modelagem proposto, num sistema flexível de montagem existente, para ilustrar a utilidade e as vantagens deste em especial para a representação, detalhamento e detecção de falhas do controle de FAS.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho e sugestões de novas abordagens para a continuação deste trabalho em futuras pesquisas.

2. SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MONTAGEM (FAS)

Para poder definir Sistemas Flexíveis de Montagem (FAS – do inglês *Flexible Assembly Systems*) é preciso fazer uma introdução breve de Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS – do inglês *Flexible Manufacturing Systems*), já que este é considerado como um sistema mais abrangente. Os FMS (DA SILVA; DOS SANTOS, 2003) envolvem um conjunto de máquinas com comando computadorizado que estão interconectadas fisicamente e logicamente para realizar diferentes processos de manufatura² através da transferência, manipulação e processamento de material e de informação. Os FMS podem distinguir-se de outras formas de manufatura automatizada por possuir as seguintes características:

- variedade de produtos (flexibilidade de produto);
- adaptabilidade das máquinas (flexibilidade de máquina);
- similaridade de processos (flexibilidade de processo).

Künzle (1990) considera como parte fundamental de FMS os subsistemas de manufatura compostos por equipamentos que incrementam o valor agregado do produto, tais como: máquinas-ferramentas com comando numérico e sistemas de montagem. Neste contexto, considera-se o sistema de montagem como parte fundamental e diferencial de FMS.

Um sistema de montagem é composto por um conjunto de células de produção com diferentes funcionalidades tais como: unir/compor peças, armazenar produtos, alimentar componentes do produto, etc. Estas células estão interligadas por um sistema de transporte que carrega, descarrega e manuseia o material de montagem pelo sistema. Esse manuseio é realizado de acordo com a funcionalidade exigida a cada momento do processamento do produto final. Para que as células de produção sejam mais flexíveis estas são subdivididas em estações de trabalho, que possuem diferentes equipamentos de transporte, alimentação e armazenamento com capacidades finitas de entrada e saída de produtos (KÜNZLE, 1990). Geralmente,

² Processos de fabricação mecânicos que em geral, têm lugar num estabelecimento industrial; fábrica, indústria (MIYAGI, 1996).

cada estação de trabalho possui manipuladores³ para diferentes tarefas de apoio (SAWIK, 2004).

Desta forma, para Da Silva; Dos Santos (2004) o conjunto de estações de trabalho ou células de produção, junto a um sistema de transporte, formam os Sistemas Flexíveis de Montagem (FAS), que apresentam um alto grau de flexibilidade operacional e podem ser divididos em dois subsistemas: (a) manuseio de material – responsável direto pelo armazenamento, manipulação, verificação, transporte e montagem dos componentes do produto e (b) controle – responsável direto pelo gerenciamento do sistema.

Segundo Künzle (1990) as células de produção dentro do contexto de FAS devem possuir as seguintes características:

- robustez de desenho, para suportar o elevado índice de utilização;
- precisão na execução de suas tarefas, com funções de autocorreção de desvios;
- capacidade de montar vários produtos com diferentes características compartilhando os mesmos equipamentos;
- elevado grau de automação, de forma a possibilitar o funcionamento autônomo por várias horas.

A flexibilidade dos FAS está relacionada com a habilidade em responder ou adaptar-se a alterações ou novas situações. Esta flexibilidade pode ser estabelecida como flexibilidade de longo alcance e flexibilidade de curto alcance (KÜNZLE, 1990):

- flexibilidade de longo alcance: consiste na reconfiguração do sistema para novas estratégias de montagem, através da alteração no programa de montagem, no plano de trabalho, no uso de equipamentos ou nas capacidades quantitativas e qualitativas de uma determinada produção;

³ Braço mecânico multifuncional que realiza o transporte e distribuição de material através de movimentos variáveis, e é parte do sistema com uso compartilhado pelas estações (BIANCHI; RILLO, 1997).

- flexibilidade de curto alcance: consiste na execução de diferentes tarefas de montagem dentro do alcance de um programa de montagem, equipamentos ou planos de trabalho já existentes.

No ambiente industrial a flexibilidade num sistema de montagem é de suma importância pela capacidade e eficiência de resposta frente à ocorrência de novas situações, de forma rápida e econômica (CEBALLOS, 1992).

Assim, para obter um aumento na flexibilidade de um sistema de montagem é necessário identificar quatro fatores estratégicos no sistema: recursos humanos, equipamentos, estrutura do fluxo de montagem (ou funções que são requeridas para a montagem) e sistema de controle. Cada um dos fatores é dependente do comportamento dos outros, como é ilustrado na Figura 2.1 (CEBALLOS, 1992).

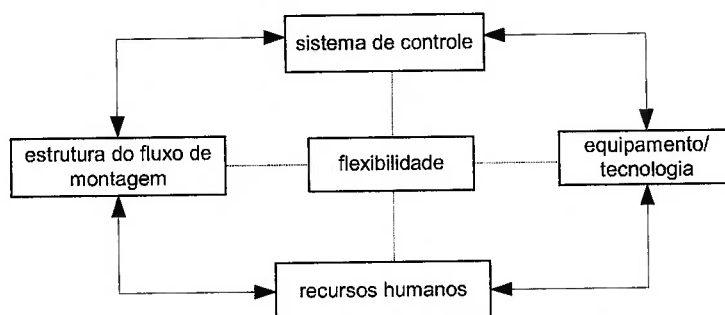


Figura 2.1. Fatores da flexibilidade de um sistema de montagem (CEBALLOS, 1992).

Se um destes fatores trabalhar negativamente, compromete-se a flexibilidade do sistema aumentando assim a ocorrência de paradas desnecessárias e reduzindo a capacidade e eficiência própria dos FAS.

As diferentes formas de flexibilidade que podem existir em FAS são apresentadas a seguir (CEBALLOS, 1992):

a. Flexibilidade de processo

Definida como a capacidade de variar o fluxo das funções necessárias para completar uma tarefa, permitindo enfrentar situações imprevistas como a troca ou manutenção de equipamentos.

b. Flexibilidade de roteiro

Definida como a capacidade de escolher outro caminho fora da ordem inicialmente prevista sem alterar o processo de montagem estabelecido pelo sistema. A flexibilidade de roteiro é dependente da existência de alternativas de montagem, sendo executada por manipuladores, braços robóticos e sistemas de transporte.

c. Flexibilidade de produto

Entendida como a capacidade do sistema de montar um novo produto usando os mesmos equipamentos de um sistema de montagem. A viabilidade de realizar este novo produto pelo sistema está relacionada com o custo envolvido, velocidade de montagem e a demanda das tarefas a serem executadas pelo sistema.

d. Flexibilidade de volume

Definida como a capacidade operacional de atender diferentes quantidades de armazenagem na entrada de componentes de montagem ou na saída de produtos finais.

e. Flexibilidade de montagem

É o universo de produtos que o sistema pode produzir, isto é, a capacidade do sistema para produzir uma variedade ou série de produtos sem necessidade de adicionar equipamentos. Outra definição é a capacidade de variar rápida e economicamente o conjunto de componentes de um produto que o sistema deve produzir.

Assim, frente a estas diferentes definições de formas de flexibilidade pode-se concluir que as flexibilidades de roteiro, volume e montagem estão mais relacionadas com o subsistema de manuseio de material, e as flexibilidades de processo e produto estão mais relacionadas com o subsistema de controle.

Conseqüentemente, pode-se afirmar que o projeto de FAS envolve a modelagem e análise para a seleção e integração de um número diverso de sistemas mecânicos/eletro-eletrônicos/computacionais que devem estar devidamente organizados e controlados para serem capazes de montar vários produtos. Estes

sistemas apresentam diversas especificações na variedade de produtos que dependem de fatores como material, dimensões, tipo de acabamento das partes envolvidas, modelo do produto, etc. (EDMONDSON; REDFORD, 2002).

Para a modelagem e simulação do FAS pode-se adotar a definição de sistemas a eventos discretos que o delimita em relação ao seu comportamento.

2.1. Sistemas a Eventos Discretos (SED)

Para Cury (2001) um sistema a eventos discretos é uma parte limitada do universo que interage com o mundo externo através das fronteiras que o delimitam e que pode perceber as ocorrências deste mundo externo através da recepção de estímulos ou informações, denominados “eventos”, que podem ser entendidos como o início ou o término de uma tarefa, presença de um objeto, condições ambientais, etc.. A ocorrência de um evento causa, em geral, uma mudança interna no estado do sistema a qual pode ou não se manifestar a um observador externo.

Além disso, a mudança de um estado discreto do sistema pode ser causada pela ocorrência de um evento interno, tal como o término de uma atividade ou o fim de uma temporização. Em qualquer caso, essas mudanças de estado caracterizam-se por serem instantâneas, isto é, o sistema reage imediatamente, acomodando-se a uma nova situação, onde permanecerá até que ocorra um novo evento (CURY, 2001).

Sistemas a Eventos Discretos (SED) são então entendidos como sistemas dinâmicos que evoluem de acordo com a ocorrência de eventos (instantâneos), em geral irregulares e desconhecidos que alteram os seus estados (discretos). Por outro lado, a passagem do tempo não necessariamente é um fator que determine a evolução dos sistemas; é necessário que ocorram eventos, sejam estes internos ou externos e, em muitos casos, estes podem ser alheios aos sistemas, de modo que estes não têm como prevêê-los.

As funções executadas pelos FAS podem ser entendidas como a ocorrência de eventos discretos tais como a entrada e saída de material, transferência de peças, posicionamento de manipuladores e braços robóticos, detecção de objetos,

verificação de material e estados caracterizados pela presença de material ou não num certo local/máquina e o próprio estado do processo de montagem (ZHA; DU; LIM, 2001).

2.2. Modelagem de um FAS

O projeto de FAS envolve a seleção de equipamentos necessários que estejam de acordo com as especificações dos produtos a serem montados e a flexibilidade desejada para o sistema. Por isso, para a elaboração destes sistemas é preciso considerar diversas funções de montagem e diversos estados dos equipamentos a serem usados (MIYAGI, 1996).

Assim, a modelagem e análise dos sistemas de montagem são técnicas fundamentais na elaboração de projetos de FAS, mas podem resultar em tarefas muito complexas se não se dispõe de ferramentas e métodos apropriados para sua realização (OFFODILE et al., 1991).

Para Zha; Du & Lim (2001) um fator importante na modelagem de FAS é a experiência do projetista, porque dependendo da sua perspectiva, ele pode entender a informação do sistema de uma forma particular. Estas informações estão de fato, incluídas nas especificações do produto a ser montado, mas não necessariamente de modo explícito. E, é por isso que nos sistemas modernos de montagem se requer uma estratégia de projeto, que seja capaz de entender a interação de componentes heterogêneos que atuam em conjunto no produto e no processo de montagem deste.

Para isto, o projetista numa primeira fase deve construir modelos separados de cada um dos dispositivos de FAS para depois avaliá-los concomitantemente no que diz respeito ao funcionamento, desempenho, segurança e flexibilidade do sistema. Na prática, a modelagem de sistemas de montagem deve funcionar concomitantemente com a análise (inclusive por simulação) e a possibilidade de um re-projeto do processo de montagem (ZHA; DU; LIM, 2001).

Em Miyagi (1996) estes dispositivos de FAS são chamados de “dispositivos de controle” e segundo uma abordagem de SED estes dispositivos executam operações

pré-estabelecidas. Assim, a modelagem destes dispositivos deve satisfazer às necessidades da demanda e levar em conta as capacidades e restrições da instalação.

Segundo Künzle (1990) as operações pré-estabelecidas para estes dispositivos que são os encarregados do manuseio e transporte das peças a serem montadas, são regidas por uma entidade que supervisiona os FAS em função dos volumes e prazos de produção.

Além disso, considera-se que o “controle” de FAS é a entidade que realiza a ligação entre os dispositivos do sistema e as metas de produção do processo de montagem. Desta forma, a palavra controle representa todos os aspectos de decisão associados à operação do sistema, desde o controle de processos de montagem até a implementação das políticas de gestão e administração da produção (KÜNZLE, 1990).

A distribuição e comunicação dos dispositivos de controle para FAS podem ser abordadas como SED (MIYAGI, 1996). Na Figura 2.2. são ilustrados os diferentes dispositivos de controle ou componentes físicos de FAS e as suas interações, através de uma lógica de controle ou também chamada de sinais de entrada e saída. Estes “dispositivos de controle” atuam sobre o chamado “objeto de controle”, formando assim o “sistema de controle”. O sistema de controle pode comunicar-se com outras entidades da fábrica através do operador ou usuário, que pode visualizar e/ou comandar a alteração dos estados do sistema, e através do fluxo de material/recursos trabalhados para a saída das peças montadas. Toda esta interação existente no que envolve um FAS é definida como a estrutura do sistema de controle que pode ser visualizada na Figura 2.2.

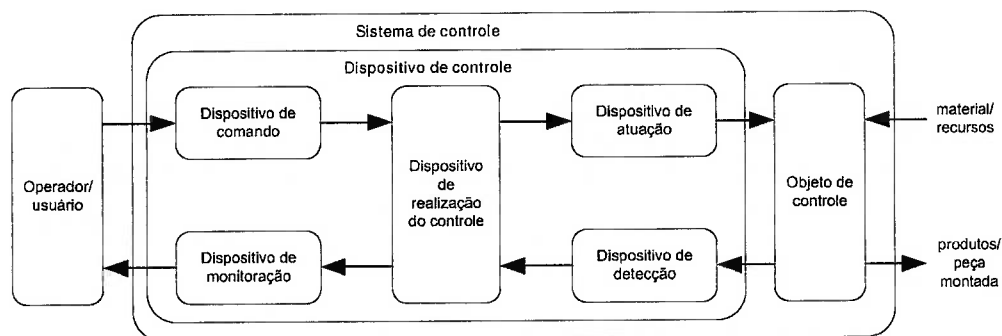


Figura 2.2. Estrutura do sistema de controle para SED (adaptado de MIYAGI, 1996).

Segundo a Figura 2.2, no que diz respeito ao dispositivo de realização do controle, são entendidos como “sinais de entrada” os sinais dos dispositivos de comando e de detecção e, como “sinais de saída”, os sinais dos dispositivos de atuação e de monitoração.

Sabendo a composição de dispositivos de FAS estes podem ser modelados separadamente, adotando uma abordagem hierárquica dos comportamentos dinâmicos dos sistemas, separando-os por níveis que tratam um determinado grupo de equipamentos que realizam certas tarefas dentro dos sistemas. Estes níveis estão representados graficamente por uma “pirâmide”. A Figura 2.3 ilustra a hierarquia desta pirâmide de FAS onde o sistema que fica no nível superior de qualquer outro é considerado o responsável pela coordenação das operações em conjunto das partes no nível imediatamente inferior. Assim, esta pirâmide pode ser dividida em cinco níveis: dispositivos, equipamentos, estações de trabalho, células de produção junto com seu sistema de transporte, e a fábrica na parte superior, que reúne todos os outros subsistemas anteriormente mencionados (KÜNZLE, 1990). No nível de fábrica é que se define a interação com outros sistemas da planta industrial.

Depois de se ter definido os FAS, os seus tipos de controle e hierarquia, é importante saber das ameaças às quais estes estão expostos, como também de técnicas que ajudem a evitar tais ameaças.

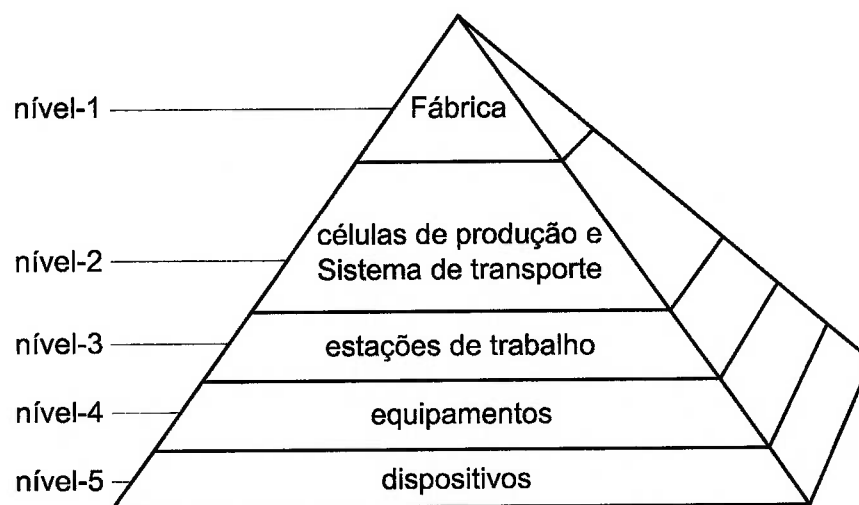


Figura 2.3. Hierarquia de um FAS

2.3. Ameaças para o bom funcionamento de FAS

Para Alcorta-Gracia; Saucedo-Flores (2003) todo componente físico de FAS está propenso a alterações em seus parâmetros que modificam o comportamento para o qual foi projetado. Estas alterações ameaçam o bom funcionamento dos FAS gerando reduções no desempenho e até acidentes. Estas ameaças são identificadas como “erro”, “defeito” e “falha”.

Para Chang et al., (1991) um erro (ou *error* em inglês) pode ocorrer quando algum componente de FAS ou conjunto de componentes atinge um estado indesejado. O defeito (ou *failure* em inglês) em FAS ocorre quando o operador percebe que o processo não está oferecendo o serviço esperado. Assim, dentro deste contexto a falha (ou *fault* em inglês) é originada por um defeito resultante de um erro ou seqüência de erros.

Em Avizienis et al., (2004) é feita uma comparação destas três ameaças da seguinte maneira: um processo, por exemplo, um dos processos de montagem de FAS, é entendido como correto quando este executa as funções ideais ou nominais previstas do sistema. Um defeito num destes processos ocorre quando o processo é desviado do que é considerado correto, ideal ou nominal. Assim, um defeito no processo é a passagem do processo correto para o processo incorreto, isto é, a não execução das funções ideais ou nominais previstas. Já a passagem de um processo incorreto para um processo correto é chamada de restauração do processo. Se um processo de montagem apresenta um fluxo de estados seqüenciais, paralelos, concorrentes ou assíncronos, então, um processo com defeito indica que pelo menos um ou mais desses estados do processo não está operando de forma correta. As alterações hipotéticas ou julgadas de um defeito são causadas por erros, que podem ser internos ou externos ao sistema. Um erro externo pode habilitar um erro interno, que afeta as funções do sistema causando assim um defeito e uma falha subsequente. Por esta razão, a identificação de um erro é fundamental para saber o comportamento interno do sistema que pode conduzir a um defeito. É importante ressaltar que muitos erros não alcançam o estado externo do sistema escondendo assim um defeito do processo.

Em resumo, pode-se entender o defeito num sistema como um fenômeno que é percebido quando o processo do sistema desvia-se do processo correto, e isto pode acontecer quando o processo deixa de estar de acordo com as especificações do sistema. Assim, um erro pode ocorrer quando um componente interno do sistema está funcionando incorretamente e é capaz de gerar um defeito. Por conseguinte, um erro num componente de FAS torna-se um defeito, enquanto que um defeito de um dos processos de FAS torna-se numa falha do sistema (PORTUGAL, 2004).

Neste trabalho considera-se que um erro pode manifestar-se nos diferentes dispositivos de FAS tais como: dispositivos de detecção ou sensores, dispositivos de atuação. O defeito em FAS manifesta-se no controle das funções que realizam os dispositivos, os equipamentos, as estações de trabalho, as células de produção com seu sistema de transporte, em conjunto e cada um separadamente. A falha em FAS manifesta-se no sistema como um todo, ou seja, quando as células de produção e o sistema de transporte interagem e não trabalham corretamente.

2.3.1. Falha

Todas as falhas que podem afetar os FAS durante a vida de trabalho são classificadas de acordo com sete pontos básicos, que conduzem às classes de falhas elementares, mostradas na Figura 2.4. (AVIZIENIS et al., 2004):

- Falha na fase de criação ou na fase de operação do sistema:
 - desenvolvimento: falha que ocorre durante o desenvolvimento do sistema ou na manutenção do sistema;
 - operação: falha que ocorre durante a operação ou funcionamento do sistema.
- Falhas em relação à fronteira do sistema:
 - internas: quando a falha tem origem e acontece internamente num sistema;
 - externas: quando a falha de origem externa se propaga no sistema através da interação com elementos externos ao sistema.
- Falha de causa fenomenológica:
 - naturais: falha causada por fenômenos naturais sem a participação humana;
 - humanas: quando a falha resulta de ações humanas.
- Falha em relação ao domínio:

- físicas: quando a falha envolve fenômenos físicos (componentes e equipamentos);
- lógicas: quando a falha envolve o processamento de informações, isto é, programas ou dados.
- Falha em relação ao objetivo:
 - maliciosa: falha introduzida por um humano com a finalidade de causar dano no sistema;
 - não maliciosa: falha introduzida por um humano de uma forma acidental sem a finalidade de prejudicar o sistema.

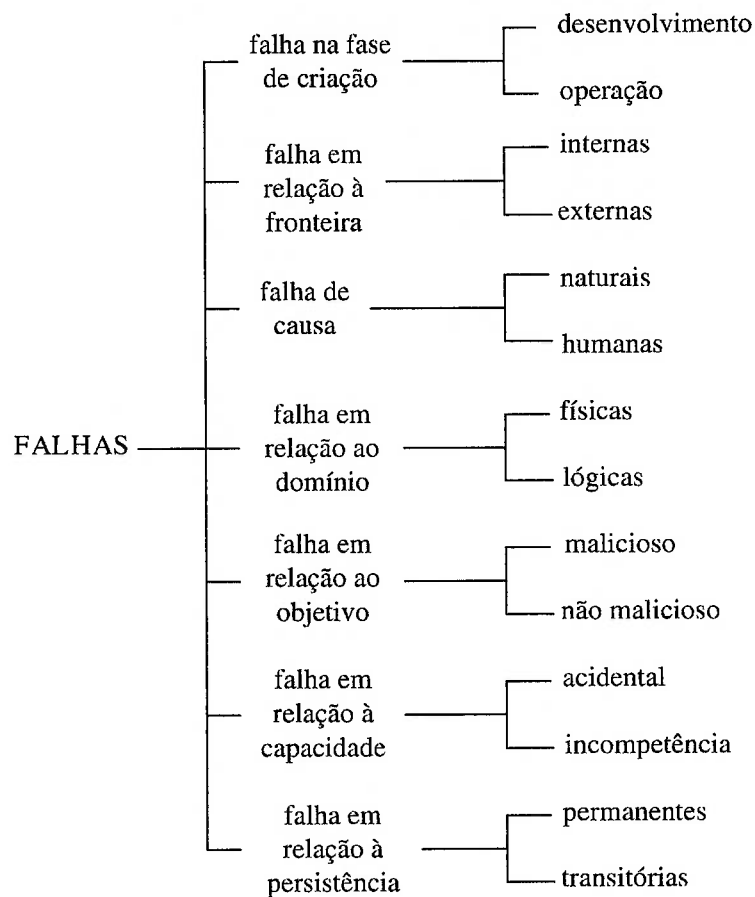


Figura 2.4. Classificação das falhas elementares (AVIZIENIS et al., 2004).

- Falha em relação à capacidade:
 - acidental: quando a falha é introduzida de maneira fortuita;
 - de incompetência: quando a falha é resultado da falta de competência profissional ou de um inadequado desenvolvimento da organização em relação ao sistema.

- Falha em relação à persistência:
 - permanente: a falha permanece até terminar uma função do processo;
 - transitória: a presença da falha é delimitada pelo tempo.

Se todas as combinações das sete classes de falhas elementares fossem possíveis, haveriam 196 diferentes combinações de falhas (AVIZIENIS et al., 2004). Porém, nem todos os critérios são aplicáveis a todas as classes de falhas. Assim, este trabalho considera cinco combinações prováveis derivadas das falhas da fase de criação, fronteira e domínio que são as necessárias para chegar às falhas de interação no sistema de controle. Já as outras quatro classes de falhas (de causa, objetivo, capacidade e persistência) não são consideradas pelo fato de serem falhas que consideram a interação com o operador, que não é o foco deste trabalho. Na Figura 2.5 é ilustrada a combinação das falhas na fase de criação, fronteira e domínio segundo Avizienis et al.(2004).

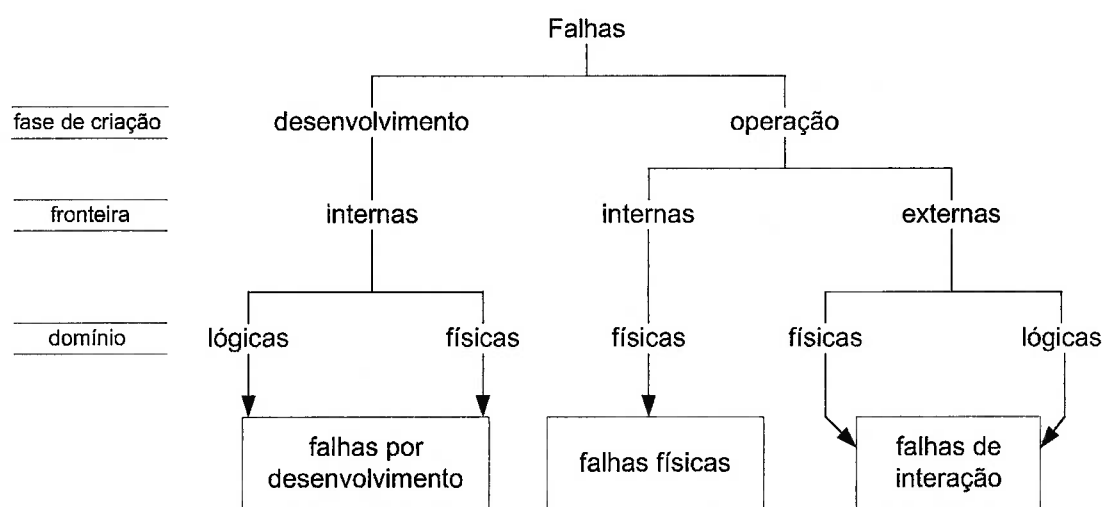


Figura 2.5. Árvore das classes de combinações de falhas.

As classes de falhas combinadas para FAS podem ser apresentadas em três grandes grupos que se misturam parcialmente:

- falhas por desenvolvimento: que inclui todas as classes de falhas que ocorrem durante o desenvolvimento e operação do sistema, podendo ser lógicas e físicas;
- falhas físicas: que inclui todas as classes de falhas internas que envolve um processo em operação;

- falhas de interação: que inclui todas as falhas da troca de informação do sistema de controle e que é produzida por fatores externos numa determinada operação de um processo de montagem.

2.3.2. Defeito

Na prática não existem sistemas que não estejam sujeitos a defeitos, assim é necessário caracterizar as maneiras pelas quais estes podem ocorrer. Estas maneiras denominam-se modos de defeito e podem classificar-se pela sua gravidade. Os modos de defeito podem caracterizar um processo como incorreto segundo os aspectos ilustrados na Figura 2.6. e que são definidos a seguir (AVIZIENIS et al., 2004):

- Domínio do defeito:
 - defeito de conteúdo: quando existe um desvio em alguma função do processo devido ao conteúdo de uma informação incorreta;
 - defeito temporário: quando um processo mantém-se funcionando ou continua sendo executado fora do intervalo de tempo especificado;
 - defeito de parada: quando a execução do processo é interrompida, ou seja, uma das funções subsequentes não é cumprida. Uma característica deste modo de defeito é o “silêncio” no sentido de que nenhum aviso é emitido pelo sistema;
 - defeito irregular: quando o sistema está operando (funcionando), mas de modo incorreto.
- Detecção do defeito: este modo pode ser classificado com base na possibilidade de sinalizar o defeito ao operador. A sinalização é uma das interfaces entre o processo e o operador e envolve os elementos do sistema que verificam a exatidão do processo. Quando algum problema se apresenta, este deve ser sinalizado através de um dispositivo de monitoração apropriado. Se isto não acontece o defeito não será identificado. Além disso, os próprios elementos de verificação e sinalização apresentam dois modos de defeito: 1) sinalização de uma perda de função quando, de fato, isto não ocorre, isto é, alarme falso; 2) não sinalização de uma perda de função que, de fato, existe, isto é, defeito não sinalizado.

- Persistência do defeito:
 - defeito constante: quando um processo incorreto é continuamente apresentado;
 - defeito inconstante: o processo incorreto não é observável de modo contínuo, isto é, dependendo do período de observação, o problema pode não ser percebido.
- Conseqüência de defeito (aqui a classificação do modo de defeito considera os custos envolvidos):
 - defeitos menores: onde as conseqüências do defeito apresentam custos similares aos benefícios de um processo eficaz de manutenção;
 - defeitos catastróficos: quando as conseqüências do defeito apresentam custos de grandezas superiores aos benefícios do funcionamento correto do sistema.

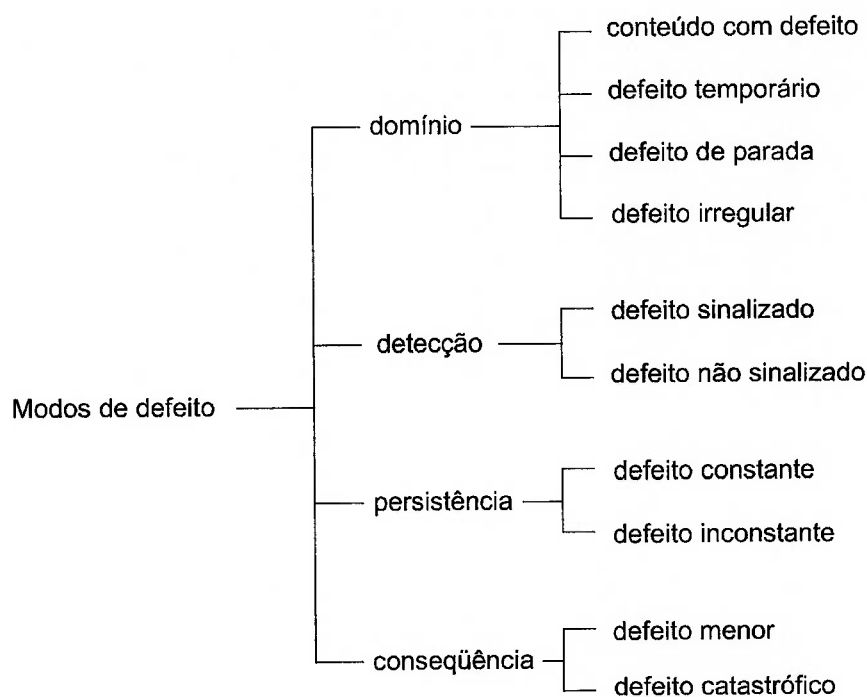


Figura 2.6. Modos de defeito (AVIZIENIS et al., 2004).

2.3.3. Erro

Um erro é o estado de um componente que pode conduzir a um defeito e logo a uma falha no sistema total. A causa de um erro é chamada também de falha. A definição implica que uma falha causa originalmente um erro dentro do estado de um ou mais dispositivos. Na Figura 2.7. pode-se observar esta seqüência de ameaças que ocorrem

dentro de um sistema, partindo de uma falha ativa um erro no funcionamento de um dispositivo, este se propaga gerando um defeito nas funções do processo de montagem, por sua vez, este causa uma falha no sistema todo (AVIZIENIS et al., 2004).

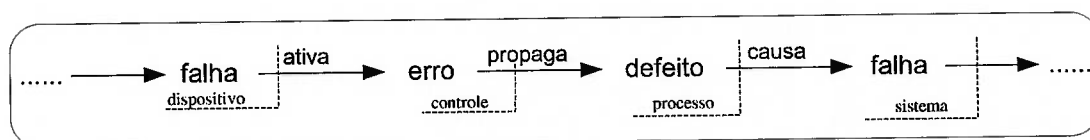


Figura 2.7. Propagação do erro (adaptado de AVIZIENIS et al., 2004).

Um erro é detectado se sua presença for indicada por uma mensagem ou um sinal de erro. Erros que estão presentes, mas que não são detectados são chamados de erros latentes. Dentro deste contexto, se um sistema é composto por um conjunto de dispositivos integrados, o estado total é o conjunto dos estados destes dispositivos que podem afetar o bom funcionamento do sistema. Sempre que o erro se manifesta externamente ao componente ocorre um defeito no processo que é observado como uma falta no sistema, mas o erro continua sendo interno ao sistema. Para um erro conduzir realmente, ou não, a um defeito no processo e depois a uma falha no sistema, depende-se de dois fatores (AVIZIENIS et al., 2004):

- A estrutura do sistema, especialmente a natureza de algumas redundâncias que existem nela:
 - redundância protetora: entendida como a introdução de mecanismos para que uma eventual falha num dispositivo, dentro dos parâmetros toleráveis, impeça ou preveja um erro que possa conduzir a um defeito no processo;
 - redundância involuntária: (na prática é difícil e quase impossível de construir um sistema sem nenhuma forma de redundância) é a ação inesperada que pode ter o mesmo resultado presumível e inesperado de uma ação intencional, ou redundância protetora.
- O comportamento do sistema: a parte de um estado que contém o erro pode eventualmente nunca ser necessária para o processo, ou eventualmente este erro pode ser eliminado antes de conduzir a um defeito, por exemplo, uma informação duplicada que evita o travamento do funcionamento de um componente.

Uma classificação conveniente dos erros deve descrevê-los em termos elementares que causam um defeito no processo. Usando a terminologia própria estes podem ser: erros detectados versus erros latentes, erros consistentes versus erros inconsistentes, quando o processo tem duas ou mais funções, erros menores versus erros catastróficos, erros de conteúdo versus erros temporários. De acordo com o sinal ou informação que recebem os componentes, estes podem apresentar erros padrões que podem ser: simples, múltiplos, necessários, imprevistos, de emenda, aritméticos, de leitura, etc. (AVIZIENIS et al., 2004).

Em FAS um erro, por exemplo, o vazamento ou o funcionamento incorreto de uma válvula de alimentação de ar comprimido, pode gerar vários erros nas diferentes células de produção do sistema, causando assim erros em mais de um componente. Assim, definem-se como erros unitários aqueles que afetam apenas um componente de um processo (PORTUGAL, 2004).

2.4. Taxa de ocorrência de falhas num FAS

Considerava-se que a ocorrência de falhas em sistemas industriais até o começo da segunda guerra mundial seguia um padrão onde a ocorrência de falhas era, em principio, constante, mas que aumentava quando os componentes físicos envelheciam (Figura 2.8.B). Durante a segunda guerra mundial, foi melhorado o conhecimento da vida inicial e do desgaste de componentes pelo uso, levando à crença geral de que todos os componentes de um sistema podiam encaixar-se na “curva da banheira” (Figura 2.8.A). Em 1978 foram publicados estudos relacionados a dados padronizados de falha nos componentes de um sistema, mudando assim o conhecimento da ocorrência de falhas até aquele momento. Desde 1990 foi revelada ainda que a ocorrência de falhas não acontece somente seguindo a “curva da banheira”, e sim que há seis diferentes curvas (Figura 2.8.) que ajustam-se a determinados componentes de um sistema (MOUBRAY, 2005).

Na Figura 2.8.C ilustra-se a ocorrência de falhas ligeiramente ascendente, mas não há uma idade que defina ou identifique o desgaste ou envelhecimento do componente. A Figura 2.8.D mostra uma taxa de ocorrência de falhas relativamente baixa quando o componente é novo ou foi recentemente adquirido, mas apresenta uma taxa constante

de falhas com o tempo, já a Figura 2.8.E apresenta uma taxa de ocorrência a falhas constante e incerta ao longo de toda a vida ou funcionamento do sistema (falha aleatória). Finalmente, a Figura 2.8.F começa com a taxa de ocorrência de falhas precoces ou iniciais, relativamente alta, mas diminui até chegar a uma taxa de falha aleatória que se mantém estável durante a vida do sistema.

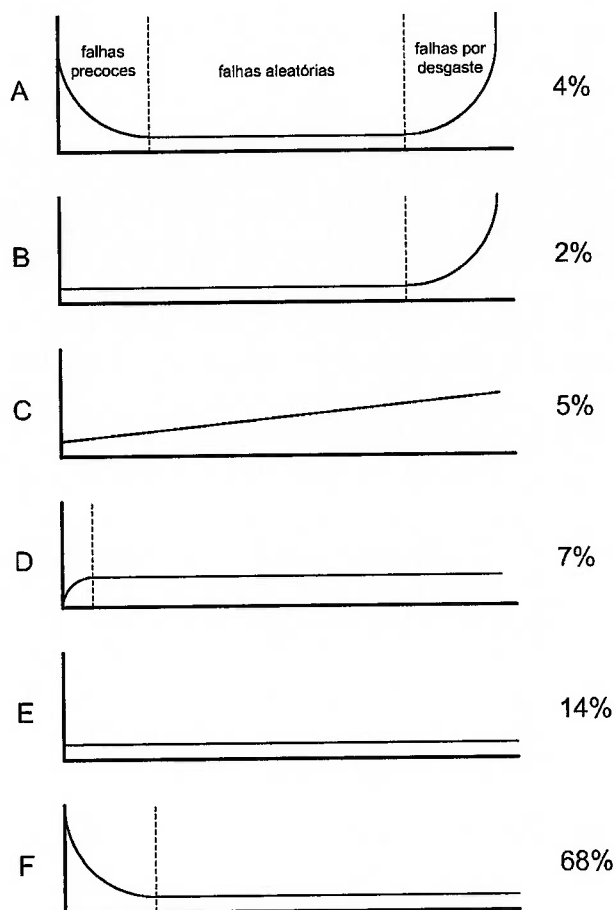


Figura 2.8. Padrões da ocorrência de falhas num sistema.

A existência destas seis curvas comprova a complexidade que apresentam hoje em dia os equipamentos e dispositivos modernos. As curvas da Figura 2.8. mostram uma taxa de ocorrência a falha no eixo vertical com relação ao tempo no eixo horizontal, para uma grande variedade de elementos mecânicos e elétricos (MOUBRAY, 2005).

De acordo com Moubray (2005), em FAS pode-se considerar que 4% dos seus componentes estão de acordo com a Figura 2.8.A, 2% com a Figura 2.8.B, 5% com a Figura 2.8.C, 7% com a Figura 2.8.D, 14% com a Figura 2.8.E e não menos de 68%

com a Figura 2.8.F. A maior porcentagem de ocorrências de falhas em FAS está na última curva devido à dificuldade na implementação de todas as funções que deve realizar o sistema, mas depois de estabilizar-se este ainda apresenta ocorrência de falhas aleatórias devido ao seu alto grau de flexibilidade. No geral, a taxa de ocorrência de falhas depende da complexidade dos equipamentos. Quanto mais complexos são os equipamentos há uma tendência que possuam uma taxa de ocorrência de falhas maior, mas ainda seguindo a curva da Figura 2.8.F. (MOUBRAY, 2005).

No trabalho de Moubray (2005) afirma-se que a maior parte da ocorrência de falhas nos sistemas complexos formados por componentes mecânicos, elétricos, pneumáticos e hidráulicos acontece de forma acidental e assim estas falhas não são fáceis de serem detectadas. Esta afirmação contradiz o pensamento de que há uma conexão entre a detecção de falhas e a idade operacional ou de funcionamento. Foi por causa deste pensamento que se criou a rotina e a crença de que quanto mais freqüentemente um componente era revisado, menor seria a ocorrência de falhas. Na atualidade, este pensamento é raramente verdadeiro a não ser que haja um tipo de falha dominante. Assim, as revisões podem até aumentar a freqüência da ocorrência de falhas precoces dentro do sistema que de outra forma seria estável, isto é, o exame desnecessário de um componente numa máquina leva a funcionamentos incorretos, ou seja, prejudica a fábrica da seguinte maneira: tempo desnecessário empregado para a possível correção, parada desnecessária da máquina e por conseguinte do processo, tempo usado desnecessariamente para acionar novamente a máquina até chegar à ponto ideal de funcionamento, etc. (MOUBRAY, 2005).

2.5. Detecção de falhas num FAS

Neste trabalho é entendido como “detecção de falhas” a identificação de um processo defeituoso para que seja localizado o dispositivo que gerou a falha no sistema. A ação de localizar o dispositivo com erro é entendida como “diagnóstico de falhas” (ALCORTA-GRAÍA; SAUCEDO-FLORES, 2003).

Então, a detecção de falhas pode ser entendida como a ação de descobrir o dispositivo cujo problema resultou num processo incorreto, que levou a uma falha no sistema (POWER; BAHRI, 2004).

Segundo Power; Bahri (2004) existem duas técnicas principais para a detecção de falhas: baseadas no modelo ou baseadas na história do processo. Estas técnicas por sua vez se subdividem em outras duas segundo sua abordagem qualitativa ou quantitativa. As técnicas de detecção de falhas são concebidas com base no conhecimento disponível que se tem do sistema (Figura 2.9.) (DASH; VENKATASUBRAMANIAN, 2000).

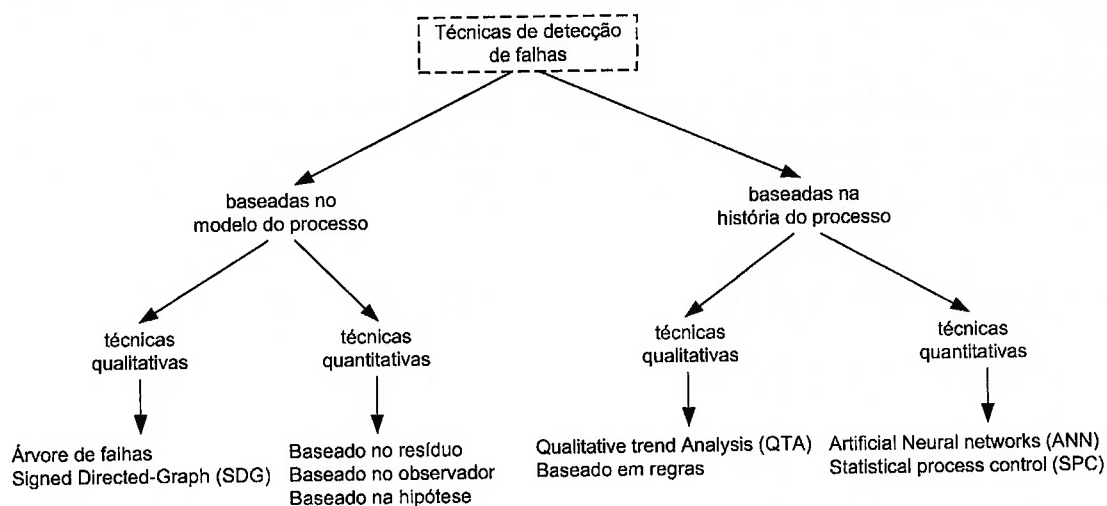


Figura 2.9. Classificação das técnicas de detecção de falhas (DASH et al., 2000).

2.5.1. Técnicas baseadas no modelo do processo

Estas técnicas contam com um modelo do processo que pode ser qualitativo ou quantitativo (Dash; Venkatasubramanian, 2000).

- **Técnicas qualitativas:** a estratégia empregada aqui é a caracterização das relações causa-efeito acerca do comportamento do sistema. Entre estes métodos destacam-se as técnicas: da árvore de falhas, e do SDG (do inglês *Signed-Directed-Graph*). Estas técnicas procuram identificar qualitativamente todas as possíveis origens de falhas.

- Técnica da árvore de falhas: esta técnica usa uma seqüência para percorrer no sentido inverso uma árvore de falhas (construída de acordo com um procedimento causa→efeito) até que um evento preliminar seja encontrado o qual indica uma possível causa da origem do desvio observado no sistema (RIASCOS, 2002).
- Técnica SDG: segundo Murata (1977) esta técnica é uma subclasse da rede de Petri que representa a informação de um sistema, onde as variáveis do sistema são representadas por nós, e as relações de causa são representadas através de arcos orientados ou direcionados.

Os modelos gerados no SDG podem ser usados para descrever o comportamento do processo e suas variáveis com condições normais e anormais. Basicamente o SDG descreve o fluxo de informação na relação causa-efeito. A marcação dos grafos SDG indica a direção do efeito (CHEN; HOWELL, 2001).

As vantagens que apresentam as técnicas qualitativas baseadas nos modelos do processo são (DASH; VENKATASUBRAMANIAN, 2000):

- ❖ requerimento mínimo de modelagem;
 - ❖ possibilidade de identificar muitas falhas;
 - ❖ relativa facilidade de explicação;
 - ❖ fácil adaptabilidade.
- Técnicas quantitativas: estas contam com as relações entre as variáveis dos sistemas envolvidos e certas condições do controle. As relações são desenvolvidas com base em princípios físicos, tais como transferência de calor e massa, resistência dos materiais, reações cinéticas, etc.. A seguir são apresentadas as técnicas quantitativas, mais conhecidas segundo o modelo do processo.
 - Técnicas baseadas no resíduo: estas técnicas geralmente estão compostas por dois passos: a geração de resíduos e a avaliação dos resíduos. Esta técnica serve para entender a causa da falha (FRANK, 1990):

- Geração de resíduos: este passo consiste na obtenção de sinais do processo que contêm as informações com falhas. Estes sinais são chamados de resíduos. Quando não existem falhas no sistema os resíduos são nulos ou zero, e são diferentes de zero quando há a presença de falha.
- Avaliação de resíduos: este passo consiste na extração da informação contida nos resíduos para ser avaliada. A avaliação proporciona informação sobre o componente que apresentou uma falha e do defeito que causou tal falha.

Embora estas técnicas sejam relativamente eficazes para sistemas dinâmicos lineares, apresentam limitações para sistemas dinâmicos não lineares (DASH; VENKATASUBRAMANIAN, 2000).

- Técnicas baseadas em hipóteses: geralmente estas técnicas dependem do ponto de vista do operador em relação ao mau funcionamento do sistema. A eficácia desta técnica que atribui a ocorrência de uma falha pelo operador a um determinado processo do sistema depende do conhecimento, formação e capacidade do mesmo, mas em muitos casos existe uma transgressão da informação em relação à hipótese do comportamento normal ou não do sistema.

2.5.2. Técnicas baseadas na história do processo

Quando é o caso, pode-se fazer uso dos dados históricos de um processo (DASH; VENKATASUBRAMANIAN, 2000). Dentro deste grupo também existem diferentes técnicas quantitativas e qualitativas. As técnicas baseadas na história do processo sofrem um inconveniente nos dados de qualidade por serem eventualmente insuficientes e inflexíveis. A seguir são descritas as principais técnicas quantitativas e qualitativas dentro desta abordagem (POWER; BAHRI, 2004).

- Técnicas qualitativas:
 - Técnicas baseadas em regras: são regras tipicamente compostas de uma parte antecedente e uma parte conseqüente na seqüência de eventos, a qual

mapeia as falhas ocorridas. A informação do histórico dos processos fornece os antecedentes e conseqüentes da falha. Este histórico pode ser entendido como uma base de dados estatísticos das falhas anteriormente ocorridas. Assim, as regras definem um mapeamento explícito de sintomas conhecidos para encontrar as suas causas.

- Técnica QTA (do inglês *Qualitative Trend Analysis*): esta técnica utiliza a informação dos dados com tendência a falha, coletada por sensores, para serem comparados com padrões, estatísticas e interpretações obtidas em falhas anteriormente identificadas. O processo de identificação deve ser robusto para as variações momentâneas (devido ao ruído, por exemplo) nos sinais medidos e capturados. Técnicas de filtragem podem ser usadas para melhorar o sinal de recepção, cuidadosamente implementadas, pois podem gerar alterações no caráter qualitativo do sinal.
- Técnicas quantitativas:
 - Técnica ANN (do inglês *Artificial Neural Networks*): esta técnica tem apresentado resultados positivos na detecção e diagnóstico de falhas de processos produtivos (DASH; VENKATASUBRAMANIAN, 2000). A ANN pode ser usada como uma estrutura que mapeia sinais de sensores, os processa e produz uma saída de acordo com as funções estabelecidas para um diagnóstico (ZAKNICH, 2003). A capacidade de auto-aprendizagem dos parâmetros da ANN e da sua interpolação de resultados é efetiva para diversas interpretações bem sucedidas sobre diagnóstico de falhas, mas esta técnica tem se mostrada apropriada somente para sistemas de pequeno porte. Para sistemas de grande porte, o tempo de treinamento da ANN e as exigências de memória aumentam para níveis muitas vezes inaceitáveis.
 - Técnica SPC (do inglês *Statistical Process Control*): esta técnica baseada em processos estatísticos tem sido usada no aprimoramento dos sistemas de controle e nas tarefas de manutenção. A idéia é focalizar a detecção em termos de controle de precisão. O SPC com apenas uma variável já tem sido aplicado na indústria, mas esta técnica detecta falhas com eficácia somente

nos distúrbios relacionados à fonte da medida individual de uma variável e fornece pouca informação sobre as interações entre as outras variáveis que são importantes para a compreensão dos processos.

Em função de resultados práticos de aplicações recentemente publicadas na área de processos industriais as técnicas quantitativas baseadas na história do processo têm se mostrado mais apropriadas principalmente para processos relativamente simples e de pequeno porte. Para sistemas de grande porte alguns pesquisadores têm proposto uma abordagem que combina as técnicas baseadas no modelo do processo com as baseadas na história do processo, isto é, a rede de Petri (PN - do inglês *Petri Net*) e suas extensões, que são descritas no próximo capítulo, é introduzida como uma alternativa para a estrutura que mapeia os sinais dos sensores, organiza os dados do sistema assim como executa a detecção. Com a PN pode-se ainda mapear os diferentes cenários do sistema de modo a se detectar falhas precoces e novas (POWER; BAHRI, 2004).

Através de PN tem-se um modelo do processo e realiza-se uma comparação dos sinais atuais do sistema com os sinais nominais (sinais em situações normais), que são previamente armazenados para identificar as situações de falha e, para realizar esta comparação de sinais pode ser adaptada a técnica quantitativa de resíduo baseada no modelo do processo, obtendo assim a localização do(s) dispositivo(s) com falha.

Em outras palavras, este trabalho realiza a modelagem e detecção de falhas dentro de uma abordagem quantitativa, baseado tanto no modelo como na história do processo.

3. REDE DE PETRI (PN)

Segundo Murata (1989) a rede de Petri (PN) foi introduzida por Carl Adam Petri em sua tese de doutorado “Comunicações com Autômatos” (ou em alemão, *Kommunikation mit Automaten*), na Alemanha em 1962. Petri em sua tese formulou a base para uma teoria de comunicação entre componentes assíncronos de um sistema computacional.

Depois de um tempo as idéias de Petri chamaram a atenção de um grupo de pesquisa da *Applied Data Research, Inc.*, dos Estados Unidos, sob a direção de Anatol Holt, que desenvolveu uma teoria de projeto chamada “*Systemics*”. A partir deste trabalho foi proporcionada a teoria inicial, notações e a própria representação da PN que foi divulgada em 1968 no relatório final do projeto “*Systemics*”. Posteriormente, no artigo “*Events and Conditions*” (HOLT; COMMONER, 1970 apud MURATA, 1989) mostra-se como a PN pode ser aplicada na modelagem e análise de sistemas com componentes concorrentes. Holt continuou desenvolvendo novos conceitos a partir de seu trabalho original “*Systemic*”, concentrando-se no desenvolvimento de ferramentas para a representação e análise de sistemas que apresentassem aspectos de concorrência e conflito.

Ainda, na década de 70, destaca-se os trabalhos no Japão e França que exploram o conceito de rede de Petri para a implementação de um padrão para uso em controladores programáveis. No Japão, esse trabalho resultou no MFG (*Mark Flow Graph*) (MIYAGI, 1996) como uma forma de especificação de processos adotado pela JIS (*Japan Industrial Standard*). Na França, esse trabalho resultou no GRAFCET (ROSÁRIO, 2005) como uma linguagem de programação de controladores programáveis. Posteriormente na década de 80 o IEC (*International Electrotechnical Commission*) definiu o SFC (*Sequential Flow Chart*), derivado do MFG e GRAFCET como uma forma de descrição da especificação de programas de controladores (MIYAGI, 1996).

A PN é definida como um grafo⁴ formal e abstrato que serve para modelar e analisar fluxos de informações. Fluxos que depois de serem modelados podem ser analisados, ajudando assim, a mostrar informações relevantes de um sistema em relação a sua estrutura e seu comportamento dinâmico. A PN é também considerada como uma ferramenta efetiva de projeto de sistemas físicos e lógicos que apresentem diversos problemas da engenharia (ITM, 2004).

Neste trabalho, para que os FAS em estudo tenham uma abordagem de SED, é fundamental que o projeto disponha de um ambiente integrado de especificação, de modelagem e de validação (inclusive por simulação) que permitam a implementação do sistema. A PN é uma técnica de descrição formal, de análise e de implementação que permite esta integração (CARDOSO; VALETTE, 1997).

Além disso, a PN que já era usada na década de 80 para a modelagem de sistemas computacionais e de manufatura foi ampliada, em relação a suas aplicações, e desde a década de 90 vem sendo usada para a modelagem, controle, planejamento, e detecção de falhas de diferentes tipos de sistemas industriais (POWER, BAHRI, 2004).

Por estas razões acima apontadas, a PN é usada neste trabalho pelo potencial para a detecção de falhas que apresenta, permitindo assim uma “boa” visualização do funcionamento do sistema.

3.1. Conceitos básicos da PN Condição - Evento

A PN é uma técnica de modelagem gráfica e matemática que pode ser aplicada a qualquer SED. Além disso, é uma ferramenta eficaz para descrever e estudar sistemas com processos concorrentes, assíncronos, de distribuição, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos. Graficamente a PN ajuda a visualizar o fluxo das funções de um sistema e, como ferramenta matemática a PN define equações de estado que governam o comportamento de um sistema (MURATA, 1989).

⁴ Diagrama composto de nós, alguns dos quais são ligados entre si por linhas, que servem para representar graficamente conjuntos de elementos inter-relacionados.

Segundo Miyagi (1996) uma classe de PN que é usada para modelagem de SED é a PN condição-evento que é representada graficamente pelo grafo que possui dois tipos de nós: os LUGARES representados por círculos, e as TRANSIÇÕES representadas por barras.

Esta PN é composta por quatro componentes estruturais básicos: um conjunto de LUGARES (P), um conjunto de TRANSIÇÕES (T), a função de entrada (I) e a função de saída (O). Estas funções de entrada e saída conectam as TRANSIÇÕES e os LUGARES. A função de entrada (I) é um mapeamento a partir do conjunto de LUGARES de entrada para cada TRANSIÇÃO, enquanto a função de saída (O) é um mapeamento a partir de cada TRANSIÇÃO para o seu conjunto de LUGARES de saída. A abstração usual envolve o entendimento de “condições” como LUGARES e “eventos” como TRANSIÇÕES.

Uma estrutura de PN pode ser definida formalmente como uma quádrupla (P, T, I, O) onde:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ é um conjunto finito de LUGARES, $n \geq 1$.
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ é um conjunto finito de TRANSIÇÕES, $m \geq 1$.
- O conjunto de LUGARES e o conjunto de TRANSIÇÕES são disjuntos então;

$$P \cup T \neq \emptyset \text{ e } P \cap T = \emptyset$$
- $I: P \Rightarrow T$ é a função de entrada de um mapeamento dos LUGARES para o conjunto de TRANSIÇÕES.
- $O: T \Rightarrow P$ é a função de saída de um mapeamento das TRANSIÇÕES para o conjunto de LUGARES.

A cardinalidade do conjunto P é n , e a cardinalidade do conjunto T é m , m e $n \in \mathbb{IN}$ (\mathbb{IN} = conjunto dos números naturais). Um elemento arbitrário de P é p_i , onde $i = 1, \dots, n$, e um elemento arbitrário de T é t_j , onde $j = 1, \dots, m$.

As funções de entrada (I) e saída (O) são representadas por ARCOS orientados (flechas) dos LUGARES até as TRANSIÇÕES e das TRANSIÇÕES até os LUGARES respectivamente, nunca de LUGAR a LUGAR nem de TRANSIÇÃO a TRANSIÇÃO.

Um ARCO pode ser orientado de um LUGAR p_i até uma TRANSIÇÃO t_j , ou de uma TRANSIÇÃO t_j até um LUGAR p_i . A razão pela qual o grafo da PN é do tipo “orientado” é porque os ARCOS são todos orientados.

De outro ponto de vista, o grafo da PN pode ser entendido, também, como um grafo bipartido (V, C) , onde $V = \{v_1, v_2, \dots, v_s\}$ é um conjunto de vértices⁵ e $C = \{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ é um conjunto de arcos orientados, $c_r = (v_j, v_k)$ onde, $v_j, v_k \in V$. O conjunto V é partilhado em dois conjuntos disjuntos P e T tal que $V = P \cup T, P \cap T = \phi$, e para cada ARCO orientado, $c_r \in C$, isto é, $c_r = (v_i, v_j)$, onde $(v_i \in P \text{ e } v_j \in T)$. Na maioria de trabalhos tanto o grafo da PN como a estrutura da PN são chamadas indistintamente como rede de Petri (ITM, 2004).

Outro componente estrutural importante da PN são as MARCAS (M_i), que são representadas como um ponto negro que reside dentro dos círculos que representam os LUGARES. A MARCAÇÃO de uma PN pode ser entendida como o vetor que indica o número de MARCAS que cada LUGAR possui numa PN. O número e a posição das MARCAS na PN podem mudar durante a execução⁶ da PN, e estas são utilizadas para definir a evolução da PN.

A MARCAÇÃO de um LUGAR específico p_i é definido como $m(p_i)$. Uma PN MARCADA é um componente estrutural da PN, isto é, PN MARCADA $= (P, T, I, O, M)$.

3.2. Regras de execução da PN condição-evento

A execução da PN (MIYAGI, 1996) é entendida neste item como o disparo de uma TRANSIÇÃO que estiver habilitada. A TRANSIÇÃO está habilitada se cada um dos

⁵ Ponto comum a duas ou mais retas a dois ou mais arcos (MIYAGI, 1996).

⁶ Execução de uma rede está associada à representação da dinâmica da rede de Petri (MIYAGI, 1996).

seus LUGARES de entrada está com MARCA e todos os LUGARES de saída não possuem MARCAS.

Na PN da Figura 3.1 a TRANSIÇÃO t_3 possui ARCOS de entrada provenientes dos LUGARES p_3 , p_4 e p_5 , e um ARCO de saída que vai para o LUGAR p_6 . Na Figura 3.1(a) a TRANSIÇÃO t_3 não está habilitada porque não tem satisfeita a sua pré-condição que seria ter uma MARCA em cada um dos LUGARES p_3 , p_4 e p_5 . Na Figura 3.1(b) mesmo tendo satisfeita sua pré-condição, a TRANSIÇÃO t_3 não está habilitada porque a pós-condição p_6 não está livre de MARCA. Já na Figura 3.1(c) apresenta-se uma TRANSIÇÃO t_3 habilitada porque tanto as pré-condições como a pós-condição, estão satisfeitas. Nesta situação a TRANSIÇÃO t_3 dispara.

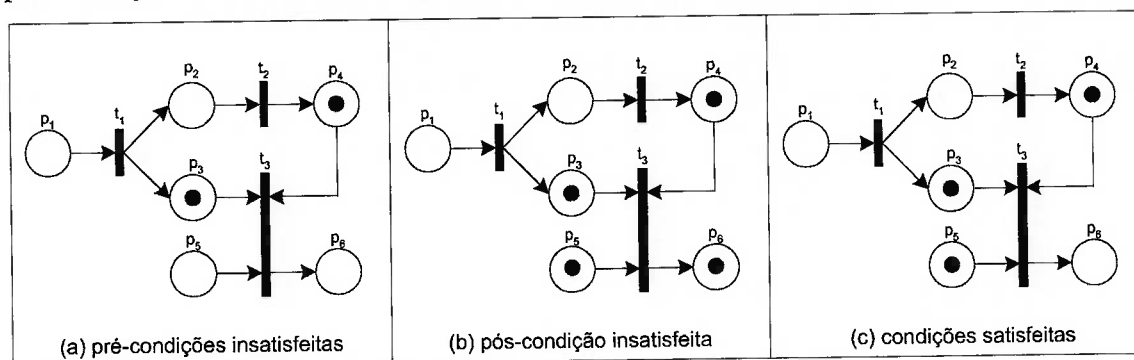


Figura 3.1. Disparo da TRANSIÇÃO t_3 .

Na Figura 3.1(c) com o disparo da TRANSIÇÃO t_3 , as MARCAS em p_3 , p_4 e p_5 desaparecem e aparece uma só no LUGAR p_6 . Mais detalhes sobre o disparo de TRANSIÇÕES em PM podem ser encontradas, por exemplo, em Miyagi (1996).

3.3. Propriedades da PN

Existem dois tipos de propriedades na PN usadas para analisar o modelo de um sistema. As do primeiro tipo envolvem a dinâmica da MARCAÇÃO e recebem diferentes nomes dependendo o autor:

- Segundo Cardoso; Vallete (1997) são chamadas de propriedades do modelo;
- Para De Moraes; Castrucci (2001) são chamadas de propriedades de desempenho;
- Em Riascos (2002) são chamadas de propriedades procedurais (que é o termo adotado neste trabalho);

- Em Silva (1985) são chamadas de propriedades gerais;
- Finalmente em Palma (2000) são chamadas de propriedades de comportamento.

O segundo tipo de propriedades é chamado de estruturais por todos os autores acima citados e dependem apenas da topologia ou estrutura da PN.

Entre as principais propriedades procedurais úteis para o presente trabalho encontra-se: a alcançabilidade, a vivacidade e a reversibilidade. As definições das propriedades procedurais da PN implicam considerações sobre o conjunto de MARCAS acessíveis a partir da MARCAÇÃO inicial.

- Alcançabilidade

A alcançabilidade é fundamental para o estudo das propriedades dinâmicas de qualquer sistema (MURATA, 1989). Numa PN, uma seqüência de disparos das TRANSIÇÕES gera uma seqüência de MARCAÇÕES. Uma MARCAÇÃO final M_f é alcançável a partir de M_0 se existe uma seqüência de disparos de TRANSIÇÕES que leva de M_0 a M_f . O conjunto de possíveis MARCAÇÕES alcançáveis a partir de M_0 numa PN é representado por $PN(M_0)$. Assim M_f é alcançável a partir de M_0 se $M_f \in PN(M_0)$

- Vivacidade

O conceito de vivacidade está relacionado com a ausência completa de travamentos na evolução da PN (ou em inglês *deadlocks*). Uma PN com MARCAÇÃO é dita viva se a partir de uma MARCAÇÃO inicial chega-se até a MARCAÇÃO final através de disparos de uma seqüência adequada das TRANSIÇÕES. Este termo de “PN viva” garante o não travamento (ou em inglês *deadlock-free*) da evolução dos estados, sem importar a seqüência de disparos escolhidos (MURATA, 1989).

Em outras palavras uma PN é chamada de viva quando um estado inicial M_0 tem todas as suas TRANSIÇÕES habilitadas. Uma TRANSIÇÃO está habilitada quando existe um estado sucessivo de M_0 .

- Reversibilidade

Uma PN é reiniciável se para M_0 existe uma seqüência de disparos de TRANSIÇÕES que permita alcançar novamente M_0 a partir de qualquer M_i derivada de M_0 . Ou seja, que a PN possa retornar ao seu estado inicial a partir de qualquer estado (MURATA, 1989).

A maioria dos sistemas possuem funcionamentos repetitivos e, portanto, a PN utilizada para representá-los são reiniciáveis. Por exemplo, quando um braço robótico apresenta uma falha, este deveria voltar ao seu estado inicial até ser consertada a falha e assim começar com a montagem de uma nova peça.

3.4. Análise da PN

As principais técnicas de análise do modelo de uma PN e que foram consideradas para este trabalho são a equação de estado e a simulação.

a. Equação de Estado

Segundo Murata (1989) uma matriz de incidência que representa as conexões entre LUGARES e TRANSIÇÕES é utilizada para representar a estrutura da PN e caracterizar o comportamento dinâmico do sistema. Para uma PN = (P, T, I, O, M) a matriz de incidência é definida como $A = [a_{ij}]$, de n LUGARES e m TRANSIÇÕES formando assim a matriz $n \times m$, onde as linhas correspondem aos LUGARES e as colunas correspondem às TRANSIÇÕES, tal que:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{se } O(t_i) = p_j \\ -1 & \text{se } I(t_i) = p_j \\ 0 & \text{de outra maneira} \end{cases}$$

Além da matriz de incidência, outro componente da equação de estado é o vetor de disparo da TRANSIÇÃO t_j que é representado por um vetor u , $m \times 1$, onde todos os elementos são nulos exceto o k -ésimo (MURATA, 1989).

Para Cardoso; Valette (1997) o vetor u representa o número de ocorrências da TRANSIÇÃO t_j em uma seqüência de disparo.

Em termos de A e de u o disparo da TRANSIÇÃO t_j leva a MARCAÇÃO M_0 a M_f por meio da equação:

$$M_f = M_0 + A \cdot u$$

Onde M_f e M_0 são $n \times 1$, A é $n \times m$, e u é $m \times 1$.

A Figura 3.2 serve como exemplo para ilustrar o cálculo de M_f usando a equação de estado.

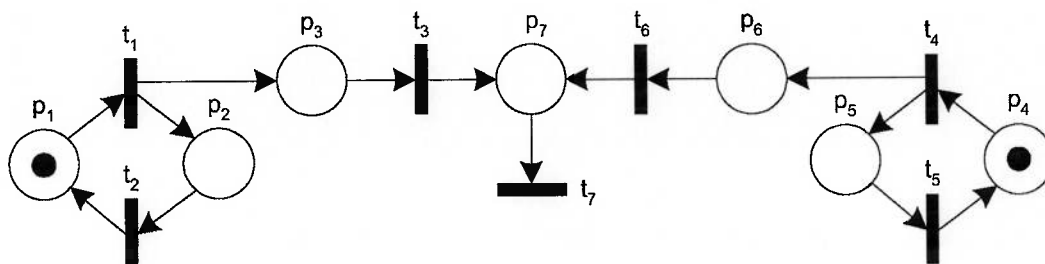


Figura 3.2. Grafo de uma PN

Assim, a matriz de incidência da PN da Figura 3.2 é:

$$A = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Neste exemplo a PN da Figura 3.2 pode-se disparar as TRANSIÇÕES t_1 e t_4 , por estarem habilitadas, mas com o disparo destas duas TRANSIÇÕES ocorre um conflito nas TRANSIÇÕES t_3 e t_6 . Este conflito é ocasionado porque o LUGAR p_7 é a mesma pós-condição para t_3 e t_6 , mas este LUGAR só tem capacidade para uma MARCA. Então, a alimentação de MARCAS de p_7 deve assegurar que apenas uma das TRANSIÇÕES (t_3 ou t_6) seja disparada. Se considerarmos o vetor de disparo como o elemento capaz de realizar uma escolha frente a um conflito, então a equação de estado evitaria a situação de conflito, como é mostrado a seguir:

O vetor que mostra a MARCAÇÃO inicial é $M_0 = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)$, e o vetor de disparo que executa a seqüência: disparo de t_1 , disparo de t_3 é $u = (1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$. Depois de resolver a equação de estado desta PN, a MARCAÇÃO final é $M_f = (0, 1, 0, 0, 0, 0, 1)$.

$$M_f = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0) + \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot (1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$$

A PN da Figura 3.2 então muda de estado para um PN com $M_f = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)$ ilustrada na Figura 3.3.

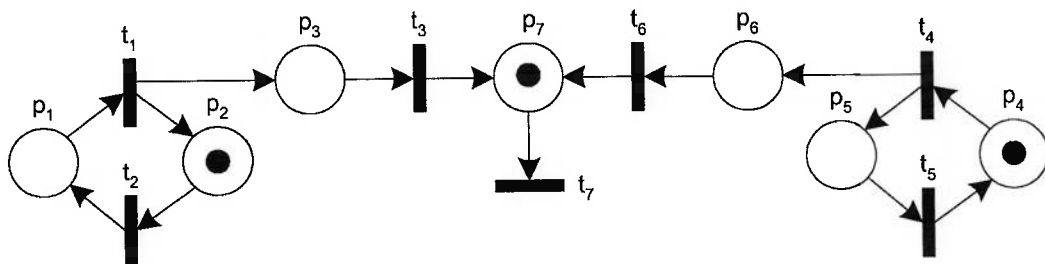


Figura 3.3. Grafo de uma PN com M_f .

b. Análise da PN por simulação

Pode-se definir a simulação como o levantamento de cenários que caracterizam situações possíveis de sistemas complexos reais ou imaginários. Além disso, permite visualizar o comportamento dos sistemas reais sem executá-los, modificá-los ou destruí-los. Também permite imitar processos de forma econômica, sendo uma ferramenta útil na tomada de decisões com as quais se procura otimizar um processo do ponto de vista de desempenho e/ou de custo (RIASCOS, 2002).

Para De Moraes; Castrucci (2001) o ponto mais importante da modelagem de um SED é que, em geral, há um enorme número de possíveis excitações externas e de eventuais eventos internos, em diferentes combinações. Então, a simulação é efetiva para prever esse comportamento quando o sistema é relativamente complexo.

No caso da PN, a simulação usa a visualização para verificar a execução de processos e sua efetividade em relação aos mesmos. A simulação gráfica de um sistema inclui a “animação” das operações envolvidas (THOMAS; NISSANKE & BAKER, 1996).

A simulação de sistemas, então, envolve a construção de um modelo de FAS para realizar experimentos a fim de compreender o comportamento dos sistemas e avaliar estratégias para a detecção de falhas (ROSÁRIO, 2005).

Neste contexto, para poder realizar a análise por simulação dos modelos neste trabalho é usado o software HPSim (2001) que apresenta uma interface intuitiva de fácil utilização que pode ser acessado e copiado pela internet. Além disso, uma das principais vantagens deste software está no acompanhamento da evolução do estado da rede de uma forma gráfica, o que auxilia no desenvolvimento do modelo. A evolução da rede pode ser simulada passo a passo ou de modo contínuo.

Além disso, este software permite ainda a armazenagem, através de tabelas, do resultado da simulação num arquivo de saída, de extensão tipo *.CSV, que pode ser usado e estudado posteriormente em softwares como o Microsoft Excel. Assim, este arquivo de saída criado pode ser entendido como o vetor de MARCAÇÃO que é a evolução do modelo a cada passo da simulação. Esta característica é essencial para a análise do sistema modelado.

3.5. Subclasses da PN

Segundo Cardoso; Valette (1997) existe uma subclasse de PN chamada de PN interpretada que está dentro da extensão das PN ordinárias ou clássicas. Para Silva (1985) esta PN ordinária é a rede que possui LUGARES de capacidade ilimitada e ARCOS com peso unitário.

Neste contexto, para Bastidas (1999) a interpretação nos componentes estruturais de uma PN em função de uma aplicação prática é muito útil e efetiva. A PN interpretada, então, associa variáveis às TRANSIÇÕES, LUGARES e MARCAS, representando assim diferentes condições aos eventos existentes no sistema. Em

sistemas de controle, tais variáveis podem indicar e/ou representar o estado dos dispositivos de atuação, detecção, monitoração e comando, permitindo assim, modelar a interação com o ambiente externo.

Há diferentes maneiras de representar a ocorrência dos eventos associados ao início e ao fim da operação. Uma delas é pelo tempo transcorrido que envolve a consideração de elementos temporizadores na PN e a outra maneira é por meio de informações do ambiente externo, como por exemplo, a informação proveniente de sensores que estão associados à habilitação ou não de uma TRANSIÇÃO. Dentre esta segunda maneira de PN interpretada destaca-se a técnica PFS/MFG (*Production Flow Schema/Mark Flow Graph*) (MIYAGI,1996).

3.5.1. Técnica PFS/MFG

Miyagi (1996) descreve a PN como uma poderosa ferramenta para a modelagem e análise de SED. Entretanto, na modelagem de sistemas complexos e com diferentes níveis de abstração evidencia-se um ponto fraco em uma de suas principais características: sua visualização gráfica. Desta maneira, verifica-se que é adequado que a modelagem inicial seja realizada utilizando interpretações não formais e, a partir deste modelo, seja conduzido um detalhamento gradativo e com interpretações formais. O PFS/MFG pode ser considerado como uma extensão interpretada da PN condição-evento, de modo que herdaram seu poder de representação, suas propriedades e suas técnicas formais de análise, próprias para aplicação em diferentes níveis de modelagem e análise de FAS.

Conseqüentemente, o PFS/MFG pode ser considerado como uma técnica de modelagem de sistemas que estabelece um procedimento sistemático e racional segundo uma abordagem baseada em sucessivos refinamentos para a obtenção do FAS de forma progressiva e estruturada. Inicialmente o modelo conceitual do sistema (representando um alto nível de abstração do sistema sem detalhamento de sua dinâmica) é desenvolvido com o PFS. Nesta etapa o propósito é modelar as principais características das funções que serão consideradas no sistema. A ênfase está na identificação dos componentes ativos e passivos do sistema, assim como do

fluxo das funções (material e/ou informação) entre estes elementos (BASTIDAS, 1999).

Na modelagem do comportamento dinâmico do sistema, o modelo em PFS é convertido progressivamente em um modelo em MFG que detalha o funcionamento das diversas partes do sistema (até o nível desejado), através da evolução dinâmica da MARCAÇÃO do grafo (MIYAGI, 1996).

O PFS/MFG como procedimento para modelar SED, originalmente foi proposto para a aplicação em sistemas de manufatura. Assim, o procedimento, pelas suas características, pode ser utilizado em FAS, onde através de uma visão macro e conceitual do sistema, os diferentes subsistemas e suas funções podem ser detalhadas até o nível de interface desejada com os dispositivos físicos da instalação.

O presente trabalho, então, considera o uso do PFS e do MFG para a modelagem conceitual e para a aplicação em diferentes níveis de detalhamento de FAS. Dentro deste contexto o PFS serve como uma técnica para sistematizar e facilitar a modelagem conceitual dos macro-eventos e o MFG é adotado para o detalhamento das funções do sistema de controle. Em seguida é detalhada a técnica PFS/MFG.

a. PFS - *Production Flow Schema*

O PFS é uma classe de PN devidamente interpretada que se constitui numa técnica para representar o nível conceitual mais alto de abstração do sistema, sem detalhamento da dinâmica dos dispositivos (MIYAGI, 1996)

Neste item o conceito de função é fundamental. Assim, é entendido como função ao objetivo de uma ação que está sendo desempenhada e não a ação propriamente dita. Além disso, enquanto a função visa o resultado a ser alcançado, a ação está ligada ao método a ser aplicado (MASSARANI; MATTOS, 1998).

Portanto, a abordagem do PFS baseia-se no princípio de que um sistema é composto por equipamentos ativos que realizam funções e equipamentos passivos que realizam a distribuição das funções. Estes equipamentos interagem entre si para realizar o fluxo de materiais e informações presentes no sistema. Deve-se salientar que o PFS

não possui o conceito de MARCAÇÃO, pois é um modelo conceitual do sistema sem descrição de sua dinâmica (BASTIDAS, 1999). Assim, por exemplo, o PFS pode caracterizar os FAS a partir do seu fluxo de informações que realizam determinados equipamentos em determinadas estações de trabalho, células de produção e/ou no sistema de transporte.

- Elementos estruturais do PFS

Os elementos estruturais de um PFS estão representados na Figura 3.4 (MIYAGI, 1996).

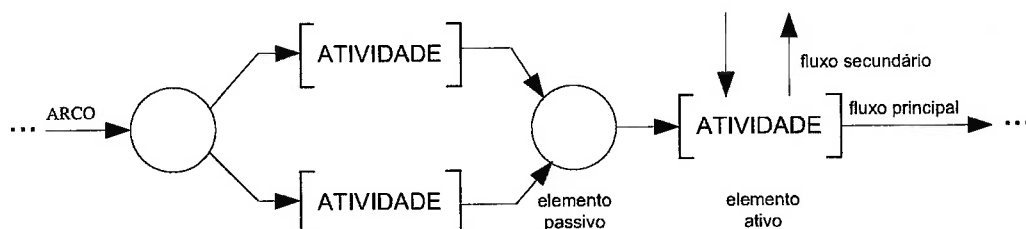


Figura 3.4. Elementos estruturais do PFS

Elemento ativo ou simplesmente Atividade: representa uma função do sistema capaz de cumprir uma ação. A atividade pode agregar uma ou mais operações. Graficamente, corresponde a uma função delimitada por colchetes que está referenciada em linguagem natural.

Elemento passivo ou simplesmente Distribuidor: representa um componente passivo capaz de armazenar uma função, sinalizar a manutenção de estados ou tornar a função visível. É indicado graficamente por uma circunferência. Um distribuidor deve existir sempre entre duas atividades que estejam relacionadas.

ARCO: conecta atividade ao distribuidor e vice-versa, representando a direção das funções de um determinado processo. Os ARCOS indicam uma relação lógica entre os componentes estruturais do PFS. Se a conexão se faz pela parte externa da atividade indica um fluxo principal de funções no sistema e, se é realizada pela parte interna, indica um fluxo secundário (este fluxo não é obrigatório). Graficamente corresponde a uma seta.

Além disso, uma forma para identificar uma função num processo que é modelado em PFS, é através da técnica do “VERBO + SUBSTANTIVO”, que é um processo semântico com o qual se pretende explicar o objetivo de uma ação, através de duas palavras: um “verbo” de ação (atuando sobre algo) e um “substantivo” (objetivo sobre o qual o “verbo” atua) (MIYAGI, 1996).

Porém, para a “boa” definição das funções deve-se ter alguns cuidados (DELL'ISOLA, 1997):

- procurar definir as funções do modo mais amplo e geral possível;
- recorrer a conhecimento especializado sempre que necessário;
- só empregar dados de fontes confiáveis;
- produzir descrições técnicas no formato “verbo + substantivo”.

Assim, uma vez identificadas as funções desempenhadas num processo, estas são classificadas conforme os níveis dos FAS à que pertencem. As funções podem ainda ser classificadas em funções básicas e funções secundárias (MASSARANI; MATTOS, 1998):

- Funções básicas e secundárias.

As funções básicas consistem na razão de ser de um sistema, ou seja, são aquelas para as quais o sistema foi projetado. Assim uma das funções básicas de FAS seria a montagem flexível de peças ou produtos, suas células de produção, sistema de transporte e estações de trabalho. As funções secundárias são aquelas que possibilitam o desempenho da função básica. Para a classificação destas funções pode ser usada a técnica do FAST (do inglês *Function Analysis System Technique*) (MASSARANI; MATTOS, 1998), derivada da engenharia do valor.

- Uso do FAST

Na análise de sistemas constituídos por diversas partes, e conseqüentemente por várias funções, é fundamental a perfeita compreensão do relacionamento e hierarquia entre elas.

Assim, a técnica FAST ajuda a encontrar as funções que são modeladas em PFS para caracterizar seu fluxo de produção. Esta técnica produz um diagrama composto pelas funções integradas de uma forma lógica, denominada árvore funcional, que consiste em formular questões lógicas e estruturar as respostas. As três perguntas sobre as funções são: “por que?”, “como?” e “quando?” (SAVE INTERNATIONAL, 2005).

A resposta da pergunta “por que?” a respeito de uma função leva às funções cuja execução dependem do prévio desempenho da função questionada, enquanto a resposta de “como?” leva às funções que devem ser desempenhadas para que estas funções possam ser efetuadas. Todas as funções são organizadas da direita para esquerda de modo que cada função tenha as respostas para “por que?” e da esquerda para direita para que tenham a resposta para “como?” (Figura 3.5) (DELL'ISOLA, 1997).

A pergunta “quando?” é feita para determinar a simultaneidade lógica de funções num mesmo nível sendo a forma de posicionar na árvore funcional as funções que não estão presentes num fluxo seqüencial de funções. Estas funções estão relacionadas com cada caso em análise. Para confirmar se a posição está correta pergunta-se “por que?”. Se a resposta for a função imediatamente à esquerda então a sua posição estará confirmada (SAVE INTERNATIONAL, 2005).

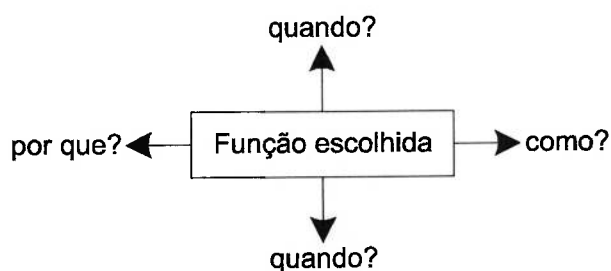


Figura 3.5. Perguntas para construção da árvore de funções.

Segundo Miyagi (1996) o FAST que inter-relaciona as funções de um processo pode ser utilizado para a verificação e correção de tarefas como:

- verificação das funções que realmente são necessárias;
- identificação das funções erradas e/ou funções dispensáveis;

- identificação da natureza e abrangência das funções;
- adição das funções que faltam.

b. MFG - *Mark Flow Graph*

Para a especificação detalhada e concreta dos sinais de controle em FAS é usada a técnica MFG, a qual é uma PN interpretada derivada da PN condição-evento (MIYAGI, 1996) que modela o comportamento do sistema, tendo a capacidade de representar a dinâmica de processos assíncronos, sequenciais, paralelos, concorrentes, etc.. Nesta rede também podem ser vistas as propriedades de alcançabilidade, vivacidade e reversibilidade.

• Elementos estruturais do MFG

Os elementos estruturais do MFG descritos em Miyagi (1996) são ilustrados na Figura 3.6.

TRANSIÇÕES: correspondem aos eventos que causam a mudança de estado do sistema.

BOXES: representam condições (pré e pós-condições de eventos) que podem estar associadas ao modo de operação ou à disponibilidade de um recurso do sistema.

ARCOS: estabelecem relações causais entre as TRANSIÇÕES e os BOXES, e vice-versa.

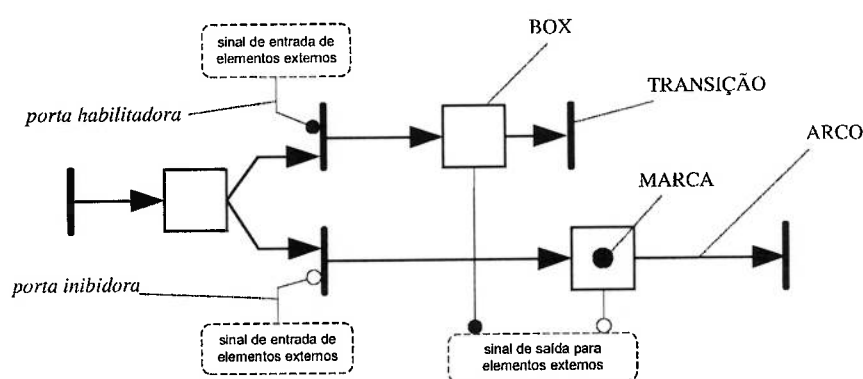


Figura 3.6. Identificação dos elementos estruturais do MFG.

Portas habilitadoras e inibidoras: estes ARCOS habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos, respectivamente. Entende-se a existência de uma MARCA num BOX como o valor binário “1”, e quando o BOX não possui MARCA o valor binário é “0”. A *porta habilitadora* é representada por um ARCO em cuja extremidade há um círculo negro que é conectado a uma TRANSIÇÃO. Quando o sinal de origem for equivalente ao valor binário “1” esta *porta* habilita a TRANSIÇÃO a qual está conectada. A *porta inibidora* graficamente corresponde a um ARCO com um círculo branco na extremidade que é conectado a uma TRANSIÇÃO. Quando o sinal de origem for equivalente ao valor binário “1” esta *porta* inibe o disparo da TRANSIÇÃO em que está conectada.

Neste trabalho a origem de uma *porta habilitadora* ou *inibidora* são BOXES que representam dispositivos de detecção. E a saída de um BOX através de uma *porta habilitadora* ou *inibidora* são sinais que vão para os dispositivos de atuação.

MARCAS: indicam a manutenção de condições e são representadas por um ponto negro no interior do BOX correspondente.

Para realizar a modelagem dos eventos de um sistema, utilizando o MFG, os BOXES e as TRANSIÇÕES devem estar conectados de forma intercalada através de ARCOS. Não existe limite para o número de ARCOS que entram ou saem dos BOXES e das TRANSIÇÕES, mas entre uma TRANSIÇÃO e um BOX pode existir apenas um ARCO, gerando paralelismos e sincronismos.

Os elementos que descrevem o comportamento dinâmico de um grafo MFG são os mesmos de uma PN condição–evento, acrescentando somente as características particulares das *portas habilitadoras e inibidoras*.

O comportamento dinâmico de FAS é representado pela evolução das MARCAS no grafo de acordo com regras de disparo das TRANSIÇÕES, ou seja, pela ocorrência de eventos ou elementos externos associados a elas. Então, através do MFG, pode-se representar o dispositivo de controle dos FAS.

- Conflito

Considerada uma característica importante da PN que diz do seu comportamento não determinístico (MIYAGI, 1996). Existe conflito quando mais de uma TRANSIÇÃO têm apenas um BOX de entrada ou apenas um BOX de saída em comum.

Se as TRANSIÇÕES t_1 e t_2 são pré-condições ou pós-condições de um só BOX, estas estão em conflito de entrada ou de saída conforme ilustrado na Figura 3.7.

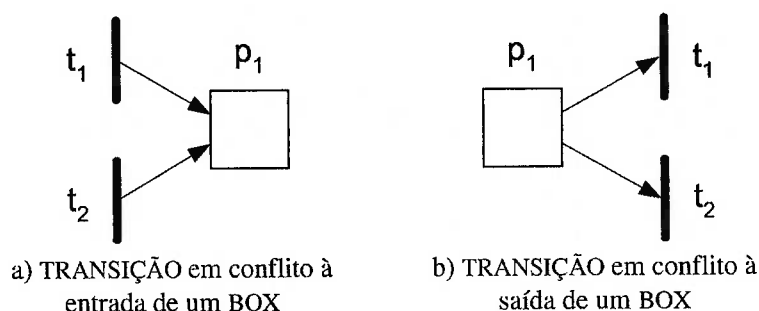


Figura 3.7. TRANSIÇÕES em conflito.

- Prioridade de disparo

Para o caso de conflito é introduzido o conceito de prioridade que impõe o disparo de uma TRANSIÇÃO. Geralmente esta imposição de disparo altera a seqüência de evolução da PN, já que desabilita-se outras TRANSIÇÕES (DE MORAIS; CASTRUCCI, 2001).

Na Figura 3.8 mostra-se uma rede MFG com $M_0=(1,0,0)$. Para que a evolução da rede atinja a MARCAÇÃO final $M_f=(0,1,0)$ deve ser imposta uma prioridade para que a TRANSIÇÃO t_1 dispare antes de t_2 . Essa prioridade de disparo pode ser imposta através de uma *porta habilitadora* em t_1 e uma *porta inibidora* em t_2 . Estas *portas* que representam sinais provenientes de elementos externos são dispositivos de detecção ou de comando (MIYAGI, 1996).

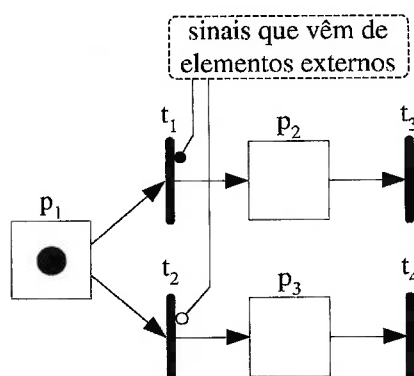


Figura 3.8. Prioridade de disparo com portas habilitadoras e inibidoras.

Neste capítulo foi definida a rede de Petri, suas principais propriedades e alguns tipos de análise. Também foi introduzida técnica PFS/MFG como uma extensão da PN condição-evento que será usado na modelagem e análise detalhada do controle de um FAS.

O MFG usa a simulação como tipo de análise e especificamente o programa HPSim para realizar esta tarefa.

4. MÉTODO DE MODELAGEM PARA DETECÇÃO DE FALHAS

Neste capítulo é apresentado um método de modelagem que considera a detecção de falhas através de uma abordagem de SED, e propriedades da PN, permitindo assim, a exploração da estrutura hierárquica do sistema, e a análise dos modelos.

4.1. Conceitos abordagem

- Estrutura do sistema

Dentro do contexto de FAS, considera-se que os dispositivos que o compõe estão interconectados formando uma rede lógica e física onde fluem informações e materiais. Estes dispositivos estão organizados e distribuídos de acordo com as operações e seqüências de montagem, que variam em função das especificações dos produtos, recursos disponíveis e grau de flexibilidade em volume e tempo considerados.

Além disso, do ponto de vista da estrutura hierárquica, os FAS podem ser divididos em níveis: de fábrica, de células de produção, de estações de trabalho, de equipamentos e de dispositivos.

Neste trabalho considera-se ainda que o nível de dispositivos está composto somente pela interação dos dispositivos de atuação e detecção com o objeto de controle e por sua vez com o dispositivo de realização do controle. Os dispositivos de monitoração e comando, além de interagir com o dispositivo de realização de controle também interagem com o operador; entretanto, ocorrências de falhas nestes dispositivos são em geral percebidas pelos operadores de modo que ações corretivas são processadas de modo direto, que não é o foco do presente trabalho (ROSÁRIO, 2005), ou seja, com este método pretende-se detectar falhas nos equipamentos mecânicos e não na capacidade dos operadores (Figura 4.1).

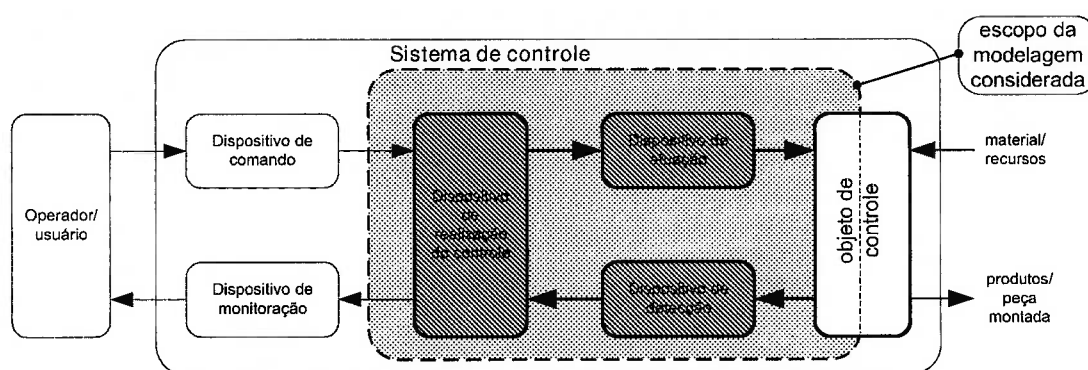


Figura 4.1. Escopo do método proposto de modelagem do sistema.

- Tipo de falha

O grau de flexibilidade das funções envolvidas em cada um dos níveis dos FAS e das interconexões dos seus dispositivos produz, nestes sistemas, ameaças em relação ao pleno funcionamento das suas atividades. As principais ameaças podem ser falhas por desenvolvimento, falhas internas físicas e falhas de interação, segundo a Figura 2.5 do item 2.3.1. As falhas por desenvolvimento ocorrem na implementação e montagem do equipamento, geralmente porque não são seguidas as indicações do fabricante ou não existe pessoal capacitado para a implementação, mas esse tipo de falha não é o caso abordado neste trabalho. As falhas internas físicas são ameaças em relação ao desgaste dos dispositivos físicos internos do sistema que frequentemente são geradas pela má manutenção, passagem do tempo, influência do ambiente de trabalho, etc., que também não é a abordagem deste trabalho. Já as falhas de interação que envolve a comunicação de informação, são as ameaças abordadas neste trabalho. Estas falhas se originam na operação do sistema através dos elementos externos, e que por sua vez produzem falhas do tipo físicas e/ou lógicas (Figura 4.2).

Estas falhas de interação do tipo físicas e/ou lógicas podem gerar erros que podem prejudicar o fluxo das funções de controle de um determinado processo nos FAS, originando defeitos nos processos. Estes defeitos manifestam-se no domínio dos FAS e podem ser (item 2.3.2): a) defeitos de conteúdo, ou seja, desvio nas funções devido a informação incorreta dos dispositivos de controle, e b) defeitos irregulares, isto é, quando as funções do processo estão funcionando, mas de modo incorreto.

Conseqüentemente, o defeito num processo origina um estado incorreto no sistema, caracterizando uma falha externa (item 2.3.3).

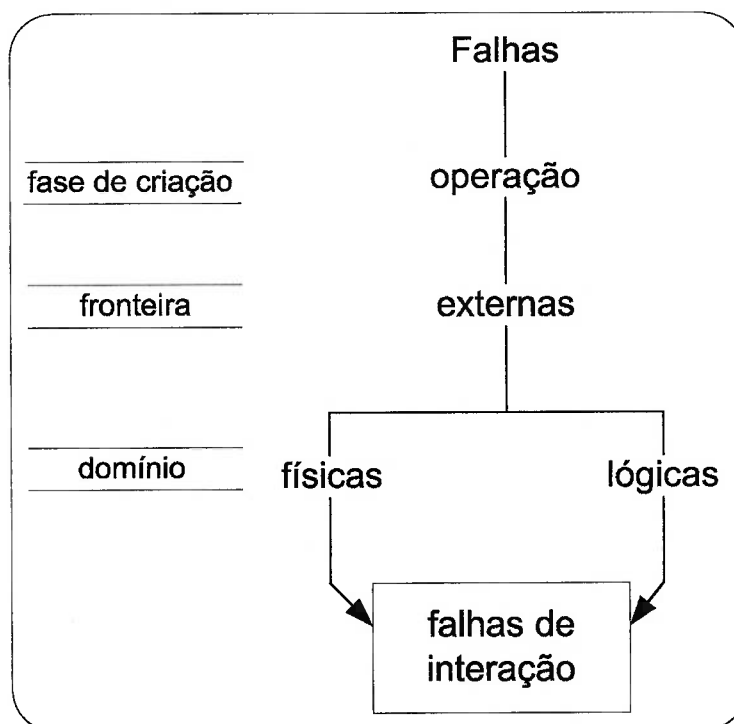


Figura 4.2. Classificação dos tipos de falha num FAS

- Taxa de ocorrência de falhas

Assume-se que a ocorrência de falhas considerada neste trabalho segue a curva da Figura 4.3, isto é, o sistema apresenta uma elevada taxa de falhas na fase de instalação e início de operação dos equipamentos, chamada de mortalidade infantil, no intervalo $(0 < t < t_a)$, e que é geralmente causada por problemas congênitos dos dispositivos ou problemas técnicos, na instalação do sistema. Esta taxa de ocorrência de falhas decresce com o tempo até chegar a t_a , que é o tempo que se levou para corrigir as falhas originadas pela instalação e operação inicial dos equipamentos, mas depois de estabilizar-se o sistema ainda apresenta a ocorrência de falhas aleatórias devido principalmente à grande flexibilidade do sistema, e a complexidade que apresentam os componentes mecânicos, pneumáticos e elétricos, em relação à interação lógica e física dos mesmos. Mais especificamente, o presente trabalho foca o intervalo $t > t_a$, isto é, quando ocorrem as chamadas falhas aleatórias ou imprevistas.

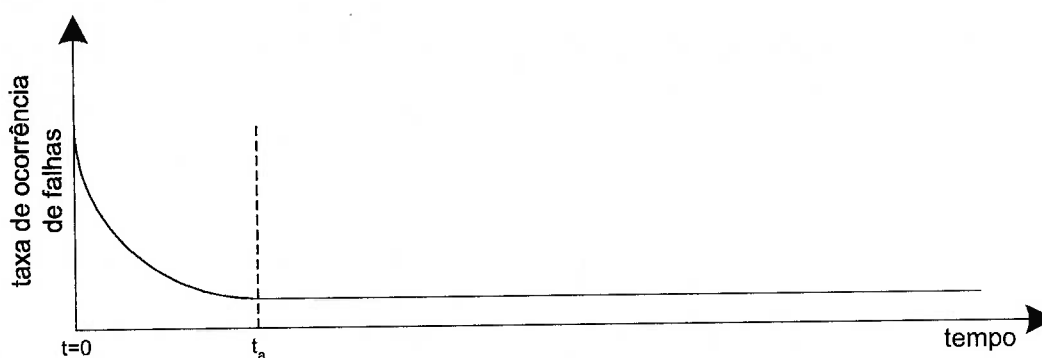


Figura 4.3. Taxa de ocorrência de falhas no FAS considerado.

Portanto, a ocorrência de falhas aleatórias em FAS tem que ser detectada a tempo para não prejudicar o funcionamento do sistema e não gerar paradas indesejadas nos processos. Assim, dentro da abordagem baseada no modelo do processo, é considerado o uso da PN como uma técnica quantitativa que serve para a modelagem de FAS. É considerada a PN, tomando como referência os trabalhos que já se aplicaram para procedimentos de detecção de falhas. Entre os trabalhos que usaram a PN na detecção de falhas destacam-se as publicações de Power; Bahri (2004) e Power; Bahri (2005) em sistemas industriais, os artigos de Hadjicostis; Verghese (2000) e Lo et al. (1997) em sistemas de potência, e o trabalho de Prock (1991) em plantas de energia nuclear.

Considerando-se ainda os problemas de complexidade nas funções, no porte e na flexibilidade de FAS, adota-se a técnica PFS/MFG. O método de modelagem proposto foca a detecção de falhas através dos dispositivos de detecção (sensores), os quais devem ajudar a impedir a propagação das mesmas afetando os níveis superiores dos FAS. Portanto, a detecção da falha neste caso envolve o nível de dispositivo.

4.2. Principais etapas do método

Depois de ter descrito os conceitos abordados neste trabalho em relação à estrutura do FAS, seus tipos de falhas, suas possíveis taxas de ocorrência e a abordagem adotada para sua detecção, neste item são apresentadas as principais etapas que fazem parte do método proposto para a modelagem do controle de FAS que visa a sua detecção de falhas (Figura 4.4).

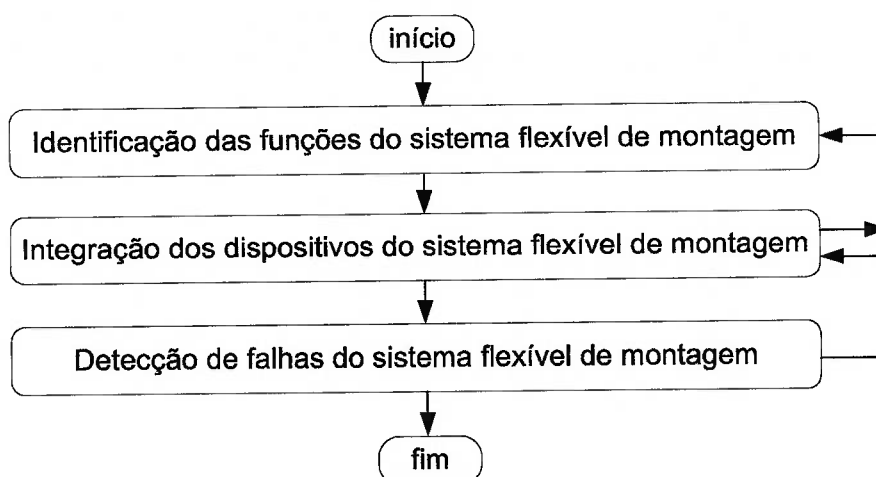


Figura 4.4. Método de modelagem da detecção de falhas em FAS.

4.2.1. Identificação das funções do sistema flexível de montagem

Esta etapa visa conhecer as funções (atividades) que são realizadas em cada um dos níveis do sistema flexível de montagem e no sistema como um todo, desde o nível de fábrica até o nível de dispositivos.

Assim, são considerados quatro passos que envolvem esta etapa, explicados a seguir:

1) Primeiro passo: descrição do funcionamento do sistema flexível de montagem.

Este passo deve considerar as seguintes fontes de dados: informações do manual de funcionamento do sistema (fabricante), informações do operador do sistema e informações através do levantamento do histórico de utilização e operação do sistema. Neste passo, devem ser elaborados diagramas esquemáticos, para entender melhor o sistema.

Após a descrição do sistema é estruturada a hierarquia do mesmo, classificando as atividades em nível de fábrica, de células de produção, de estações de trabalho, de equipamentos e de dispositivos.

2) Segundo passo: classificação e análise das funções de controle através da aplicação da engenharia do valor para caracterizá-las e organizá-las identificando assim as funções requeridas (MIYAGI, 1996).

Neste passo são estruturadas as funções por níveis sendo que as funções básicas do sistema devem estar no nível de fábrica, de células de produção e de estações

de trabalho, e as funções secundárias do sistema devem estar no nível de equipamentos e de dispositivos.

Com o uso da técnica do FAST (*Functional Analysis System Technique*) são então identificadas as funções realizadas no sistema flexível de montagem em cada um dos seus níveis, e conforme a atualização dos dados, estas funções adotam nomes mais apropriados para definir partes ou conjuntos do sistema. Por exemplo, a função principal “montar produto” que está considerada dentro do nível 1 é questionada com a pergunta; como é realizada a montagem do produto? As respostas são com (verbo + substantivo): “iniciar processo”, “montar componentes”, “receber componente 1” e “transportar componentes”. Como todas estas respostas foram para a pergunta “como?”, então, estas quatro respostas são questionadas com a pergunta “quando?” e ao serem respondidas determina-se que estas quatro funções pertencem a um mesmo nível, ou seja, ao nível 2. Questionando ainda uma das funções do nível 2, por exemplo, como receber componente 1? As respostas são, com: “alimentar componente 1” e “testar componente1”. Estas respostas então são analisadas com a pergunta, quando? chegando à conclusão que fazem parte do nível 3. Assim, para comprovar as funções encontradas até o momento, estas são questionadas em sentido contrario, por exemplo, a função “alimentar componente 1”, do nível 3, é questionada com a pergunta, por que?. E a resposta tem que ser a função do nível 2, ou seja, para “receber componente 1”. Por sua vez, esta função é também questionada com a pergunta por que? sendo sua resposta, para “montar produto”, que pertence ao nível 1. (Figura 4.5).

É importante ressaltar que pela atualização constante dos passos e para um melhor entendimento das funções do sistema que inicialmente são simplesmente verbos + substantivos posteriormente estas funções adotam nomes mais apropriados, por exemplo, a função “alimentar componente 1” muda para “estação de alimentação”, a função “receber componente 1” muda para “célula de entrada de materiais” e a função “montar produto” muda para “sistema flexível de montagem”.

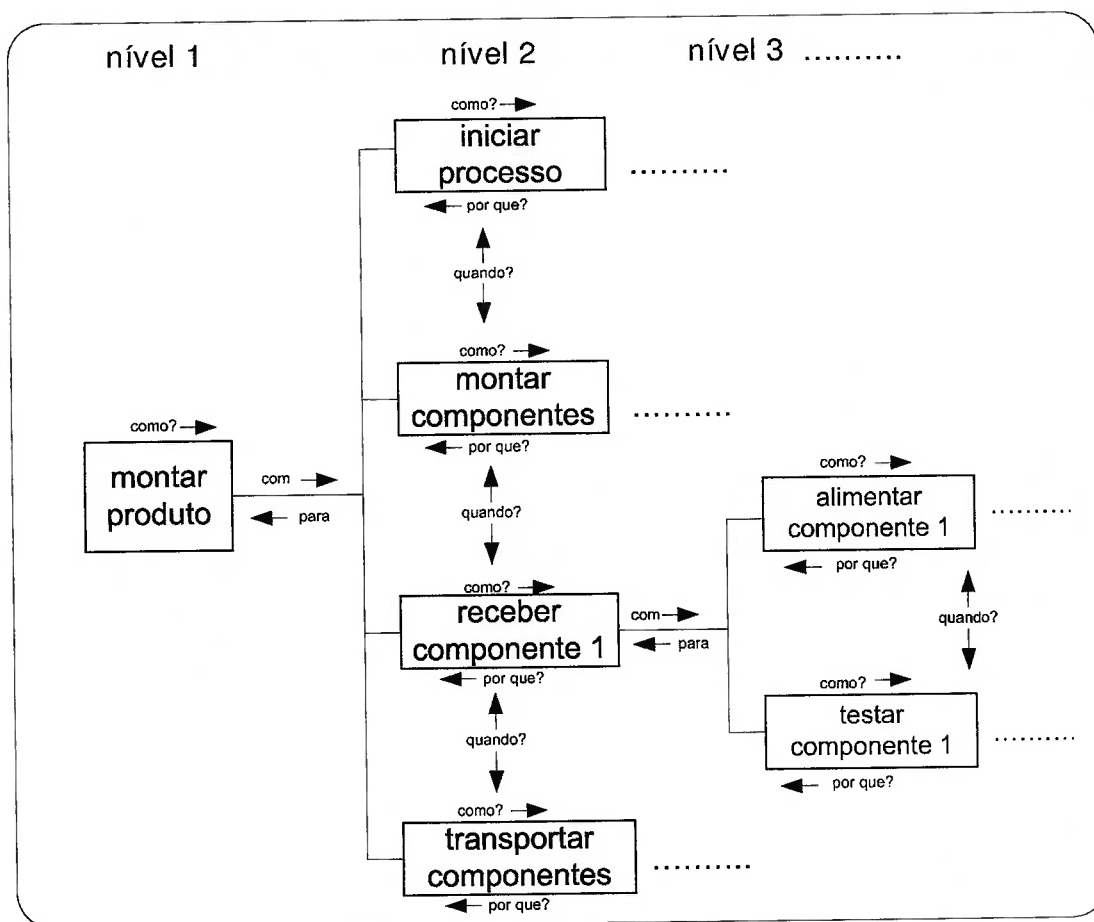


Figura 4.5. Análise das funções.

- 3) Terceiro passo: modelagem do fluxo das funções do sistema flexível de montagem através da técnica PFS/MFG. Assim, cada função encontrada na técnica do FAST é então detalhada primeiramente com a técnica PFS que mostra o fluxo de cada função, que pode apresentar seqüência, sincronização, paralelismo e conflitos, conforme ilustrado na Figura 4.6.

Para a modelagem das funções usando a técnica PFS, primeiro escolhe-se uma função de um determinado nível (de 1 a 3), por exemplo, considerando no nível 3 a função "testar componente 1", ou também conhecida como "estação de teste", as suas funções subseqüentes, ou seja, as do nível 4 são então modeladas usando o PFS para caracterizar situações de conflito, paralelismo ou seqüência, e basicamente para descrever o fluxo que realizam.

Assim, chega-se até a modelagem do nível 5 (ou nível de dispositivos), que é o último nível considerado na hierarquia do sistema. Aqui tem-se a modelagem dos

dispositivos de atuação e detecção que são usados para cada função específica deste nível. As funções no nível 5 são compreendidas como o conjunto de atividades ou funções que o dispositivo de realização de controle efetua para um determinado equipamento ou objeto de controle, num determinado processo de montagem. Assim, este último nível é detalhado usando a técnica MFG onde são encontrados os sensores e atuadores que intervêm na função escolhida (Figura 4.7).

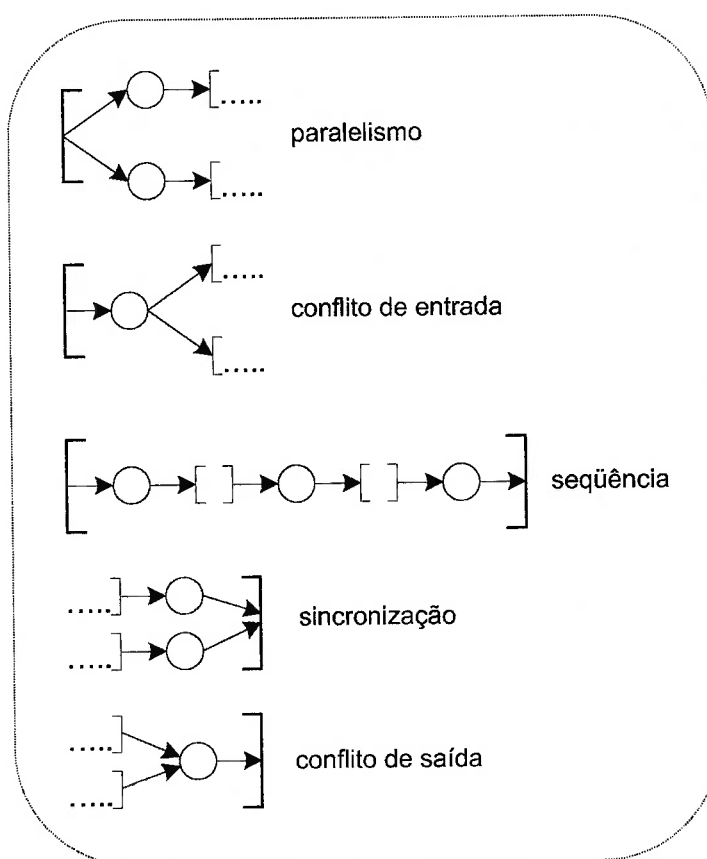


Figura 4.6. Características da interação entre atividades em PFS.

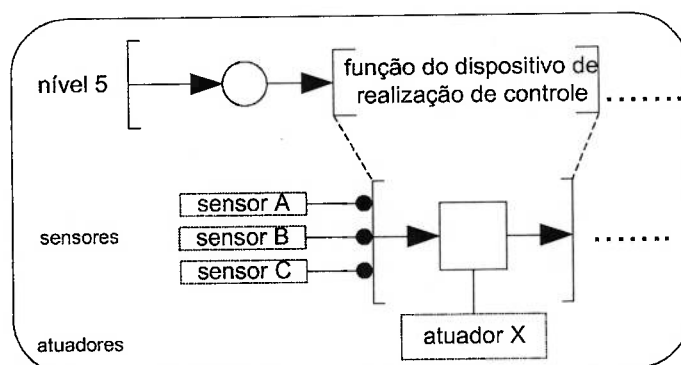


Figura 4.7. PFS/MFG do nível dispositivo.

- 4) Quarto passo: armazenagem das informações obtidas no passo anterior com relação aos dispositivos de atuação e detecção. Esta armazenagem é feita com a elaboração de tabelas contendo as informações do tipo: funções que realizam no processo de montagem e a nomenclatura que adotam, para serem reconhecidas nos modelos subseqüentes. A Tabela 4.1 é um exemplo onde a coluna da direita contém as especificações do tipo de dispositivo, que geralmente são fornecidas pelo fabricante. Uma coluna no meio que especifica a função que realiza o dispositivo no processo de montagem, definida a partir da técnica do FAST. E a coluna da esquerda que apresenta a nomenclatura adotada por cada dispositivo (Lira, 2004).

A nomenclatura da Tabela 4.1 segue a norma DIN/ISO 1219-2:1996-11 (DIN - *Deutsches Institut für Normung*)/(ISO - *International Organization for Standardization*) que identifica o dispositivo conforme a seguinte estrutura, começando pela extrema esquerda: um número que é designado para um equipamento (objeto de controle), um código designado de acordo ao tipo de dispositivo, e um número designado a um dispositivo do equipamento, conforme ilustrado na Figura 4.8. Dentro da nomenclatura adotada, os códigos dos dispositivos, ou letras, seguem a norma IEC 61346-2:2000-12 (IEC - *International Electrotechnical Commission*), mostradas em Anexo A.

Tabela 4.1. Lista dos dispositivos.

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
1B1	Função operacional que realiza o sensor ou atuador ou equipamento	Especificações técnicas dos dispositivos

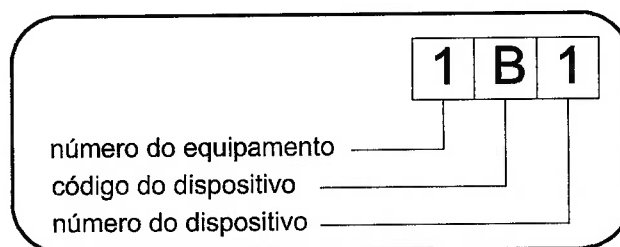


Figura 4.8. Nomenclatura usada.

4.2.2. Integração dos dispositivos do sistema flexível de montagem

A integração dos dispositivos do sistema flexível de montagem é obtida a partir do conhecimento do fluxo e composição das funções do sistema, que já foi elaborado na etapa anterior através dos seus quatro passos. Assim, nesta etapa é modelada a dinâmica física e lógica dos dispositivos de controle através da técnica MFG.

Seguindo uma abordagem modular, para a modelagem da interação dos dispositivos, isto é, no nível de dispositivos, divide-se inicialmente o modelo em três módulos, os quais para sua diferenciação neste texto estão graficamente dentro de um “bloco” com cor diferente, assim, o módulo dos atuadores adota a cor azul, o módulo dos detectores adota a cor vermelha, e o módulo da realização do controle adota a cor verde (Figura 4.10).

Como já foi dito anteriormente não é representada a dinâmica dos dispositivos de comando nem de monitoração por não ser o foco deste trabalho a detecção de falhas humanas.

Para a modelagem da interação tem-se:

1. módulo da realização de controle. Este módulo representa o dispositivo de realização do controle e envolve a interação dos fluxos, no nível 5, modelados em PFS, realizada na etapa anterior, substituindo os círculos e colchetes do PFS pelos BOXES e TRANSIÇÕES do MFG, conforme ilustrado na Figura 4.9.
2. módulo de atuação. Este módulo representa estados discretos dos atuadores que alteram o estado dos equipamentos, por exemplo, solenóide energizado ou não, motor em sentido horário ou em sentido anti-horário. A representação dos estados destes atuadores é feita por MARCAS nos BOXES.

Para que um BOX do atuador modelado mude de estado, este precisa do sinal que vem do módulo da realização de controle, que habilita/inibe a TRANSIÇÃO subsequente ao BOX. Estes sinais vêm através de *portas habilitadoras* ou *inibidoras*. (Figura 4.10).

fluxo	PFS	MFG
paralelismo		
conflito de entrada		
seqüência		
sincronização		
conflito de saída		

Figura 4.9. Nomenclatura usada.

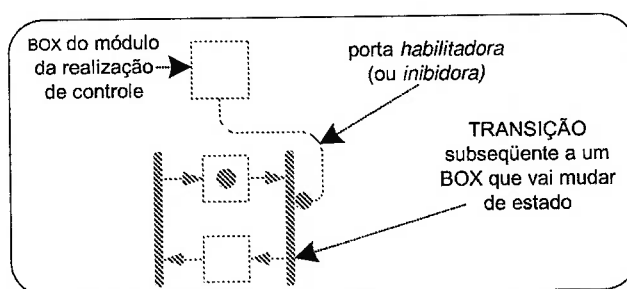


Figura 4.10. Detalhe do módulo atuador.

3. módulo dos detectores, que representam a leitura que fazem os sensores dos estados dos equipamentos. Neste módulo os estados dos sensores são representados por BOXES com uma respectiva MARCA, por exemplo, um sensor indutivo com MARCA no BOX indica que foi detectada uma peça metálica, e sem MARCA no BOX indica que não foi detectada nenhuma peça metálica.

Dos BOXES que estão no módulo dos detectores saem os sinais de habilitação/inibição até as TRANSIÇÕES do módulo da realização de controle, através de *portas habilitadoras* ou *inibidoras* (Figura 4.11).

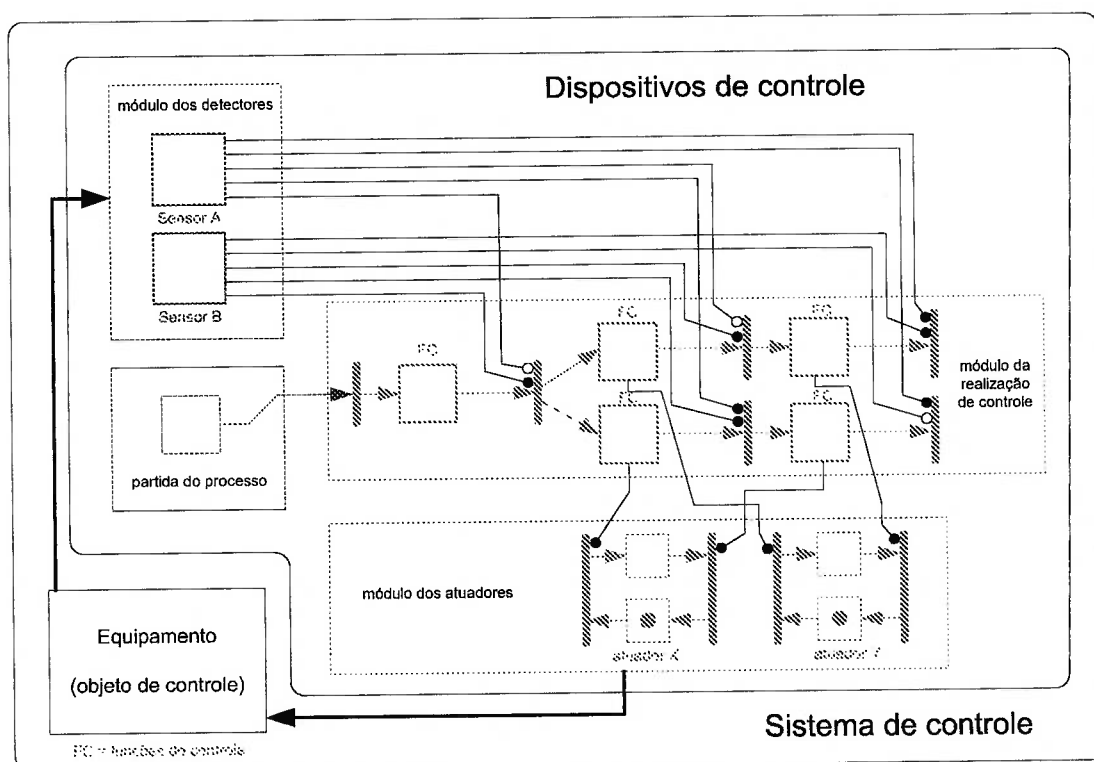


Figura 4.11. Interação das tarefas do sistema flexível de montagem.

Para a análise da interação dos módulos é feita a simulação destes utilizando o software HPSim (2001) que indica possíveis erros estruturais e desenvolve cenários da dinâmica dos processos de montagem. Depois de simulados os diferentes cenários da interação do modelo com seus equipamentos (objeto de controle), o software gera uma tabela que registra a evolução das MARCAÇÕES das funções do processo. Nesta etapa são modelados somente os processos nominais, sem falhas, dos processos de montagem e gera tabelas de cenários analisados, na forma de MARCAÇÕES válidas dos processos do sistema flexível de montagem, quando este opera corretamente. A Tabela 4.2 ilustra a armazenagem das MARCAÇÕES para cada módulo.

Tabela 4.2. Armazenagem da MARCAÇÃO de cada um dos módulos.

	MARCAÇÃO do módulo da realização do controle			MARCAÇÃO do módulo dos atuadores			MARCAÇÃO do módulo dos detectores		
MARCAÇÃO de uma função do objeto de controle	p ₃	p ₄	p ₅	p ₆	p ₇	p ₈	p ₉	p ₁₀	p ₁₁

4.2.3. Detecção de falhas no sistema flexível de montagem

A abordagem aqui considerada para a detecção de falhas é baseada na comparação entre dados coletados e dados nominais do sistema flexível de montagem que foram obtidos na etapa anterior. Assim, para o estudo quanto à ocorrência de falhas em FAS, poder-se-ia elaborar um levantamento nas indústrias que possuem FAS, mas isso envolveria muito tempo, além da necessidade de estabelecer parâmetros para comparar resultados de diferentes instalações. Assim, para a presente pesquisa, considera-se a técnica de indução de falhas no modelo do sistema, isto é, a imposição de certas situações nas operações do modelo do sistema, para desta forma avaliar o sistema em relação à identificação de possíveis falhas (ARORA; JONE; HUANG, 2004).

A abordagem de indução de falhas nos modelos é justificada porque assim evitam-se casos onde se poderiam danificar parcialmente ou totalmente os processos ou dispositivos reais do sistema flexível de montagem tendo como consequência custos elevados de manutenção e paradas de produção desnecessárias.

Assim, depois de ter modelado o sistema em PN é realizado o registro, isto é, a armazenagem de dados nominais dos sensores, atuadores e do controle, isto é, a aquisição dos dados comportamentais do modelo do sistema em situações nominais. Posteriormente, estes dados serão comparados com dados comportamentais do modelo com falhas induzidas. Para a realização desta etapa tem-se dois passos.

a) Passo a: indução de falhas

Para realizar as funções de automação é necessário o uso de vários sensores para o mapeamento de todas as possíveis posições do equipamento. Assim, o método proposto força falhas apenas nos sinais de sensores envolvidos em cada etapa do processo.

Através da etapa anterior são simulados os processos nominais que realiza cada estação de trabalho, obtendo com isto uma seqüência correta de MARCAÇÕES dos sensores. Assim, o modelo nominal que foi elaborado na etapa anterior é neste passo

utilizado para obter dados quando falhas são induzidas. Para realizar a indução de uma falha são alterados os sinais nominais do módulo dos detectores. Por exemplo, numa determinada estação de trabalho estão envolvidos 8 sensores, nesta estação para realizar uma determinada função se requer somente sinais de 2 dos sensores (informação obtida pela tabela gerada da simulação do modelo nominal para este processo específico); a indução de falhas consiste então em alterar ou mudar essa informação, isto é, força-se a ausência ou a presença de sinal nos sensores. Desta forma são simulados estados incorretos do equipamento ou dos próprios sensores. Assim, o modelo com estes dados incorretos é novamente simulado, gerando uma tabela com as MARCAÇÕES incorretas para se avaliar o efeito destes casos.

É importante ressaltar que a indução de falhas é realizada no modelo que foi introduzido no software de simulação e a ação de mudar ou alterar os sinais dos sensores refere-se a alterar parâmetros relacionados com a retirada ou inclusão de MARCAS nos BOXES que representam determinados sensores da estação de trabalho em estudo.

b) Passo b: comparação de dados e detecção de falhas

Este passo consiste na comparação dos sinais do modelo nominal armazenado e tabelado na etapa anterior com os sinais dos modelos com falhas induzidas, para assim, identificar os sinais incorretos. Esta operação acontece quando a MARCAÇÃO atual (no caso com falha induzida) difere da MARCAÇÃO nominal. A Figura 4.12 ilustra este passo.

passo a: Tabela com MARCAÇÕES nominais										passo b: Tabela com MARCAÇÃO incorreta										
MARCAÇÃO do processo	MARCAÇÃO do controle			MARCAÇÃO dos atuadores			MARCAÇÃO dos detectores			comparação	MARCAÇÃO do processo	MARCAÇÃO do controle			MARCAÇÃO dos atuadores			MARCAÇÃO dos detectores		
	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}			p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}
condições iniciais	0	0	0	0	0	0	1	0	1		condições iniciais	0	0	0	0	0	1	0	1	
funções do objeto de controle	0	█	0	0	0	0	1	0	1	→	0	█	0	0	0	0	1	0	1	
	0	1	0	█	0	0	1	0	1		0	1	0	█	0	0	1	0	1	
	0	1	0	1	0	0	█	0	1		0	1	0	1	0	0	█	0	█	

Figura 4.12. Exemplo da comparação dos dados com falhas.

Na Figura 4.12 as células de cor verde significam que a MARCA mudou de 1 para 0 ou vice versa e a cor vermelha significa que a MARCA tem falha, ou seja, MARCAÇÃO incorreta. Observa-se também que na Figura 4.12 é realizada uma

comparação entre as MARCAÇÕES obtidas nas duas situações: situação nominal (sem falha) e situação com falha.

A MARCA incorreta é localizada na Tabela 4.1. Por exemplo, se a MARCA incorreta é p_{1B1} , então, na Tabela 4.1 é localizada a nomenclatura 1B1 (Lira, 2005).

Após a identificação da MARCAÇÃO incorreta podem-se levantar hipóteses em relação ao sensor que representa a MARCA com falha:

- posicionamento incorreto do sensor,
- sensor danificado,
- atuador danificado que não age com o equipamento e este por sua vez não envia sinal ao sensor,
- falhas mecânicas no equipamento que não cumprem com seus estados estabelecidos e por sua vez não aciona os sensores envolvidos.

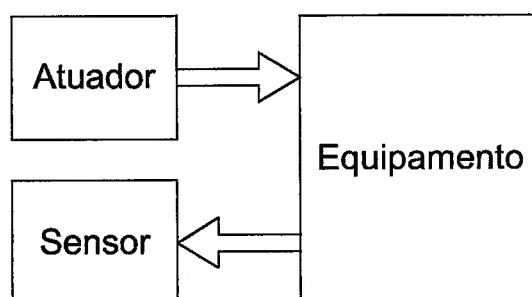


Figura 4.13. Hipótese do sensor com falha.

Finalmente, na Figura 4.13 é apresentada uma ilustração da etapa de detecção de falhas. Na Figura 4.13(a) é o modelo do sistema em MFG, a Figura 4.13(b) representa a comparação das MARCAÇÕES geradas pelo modelo nominal e pelo modelo incorreto, a Figura 4.13(c) representa a localização da MARCA incorreta para saber que dispositivo apresenta falha.

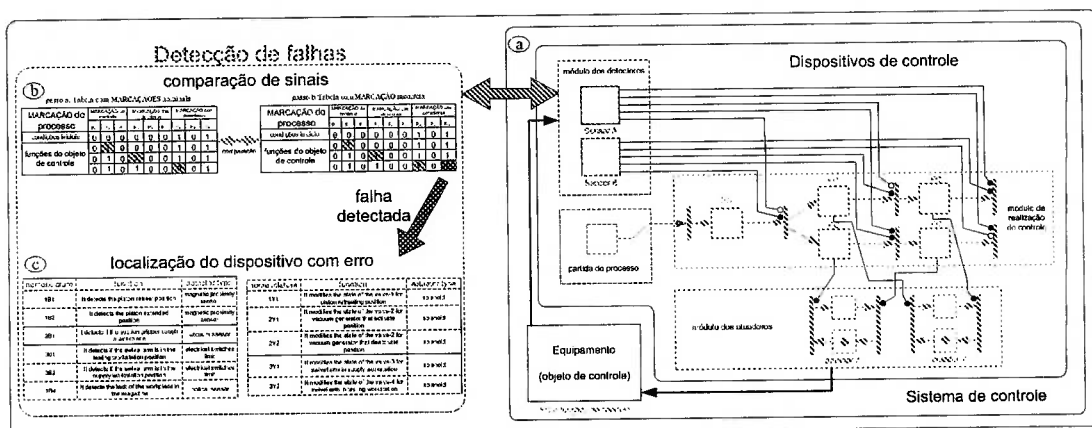


Figura 4.14. Detecção e diagnóstico de falhas no FAS.

No próximo capítulo será aplicado o método proposto num sistema de montagem real.

5. EXEMPLO APLICATIVO

Este capítulo é desenvolvido com a finalidade de ilustrar a aplicação do método proposto no capítulo 4, num sistema real. Para tal finalidade é usado um sistema de montagem flexível integrado por computador que é comercializado pela empresa FESTO (2005) e está instalado na Escola Politécnica da USP. Este sistema foi escolhido, pois apresenta todas as características encontradas em sistemas industriais.

Para isto, são apresentadas as três etapas do método de modelagem com a devida documentação dos resultados, que considera a atualização das informações.

5.1. Identificação dos componentes do sistema flexível de montagem

1) Primeiro passo: descrição do sistema flexível de montagem

O sistema em estudo possui duas células de produção e um sistema de transporte que interliga as células de produção (Figura 5.1).

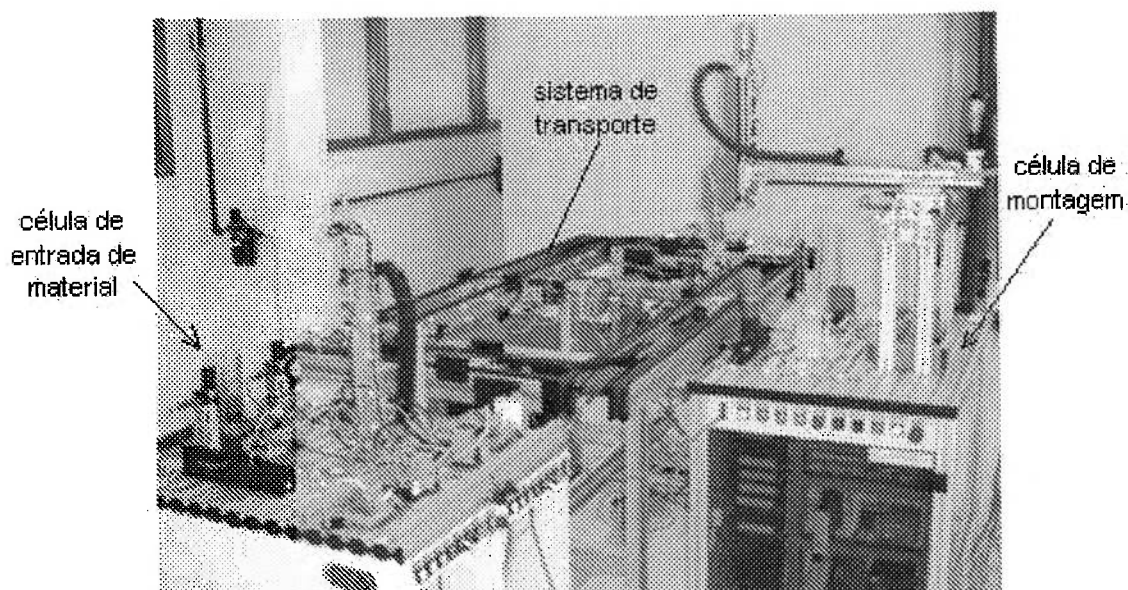


Figura 5.1. Sistema flexível de montagem integrado por computador.

O objetivo ou função principal deste sistema flexível é a montagem de um produto composto por uma peça “corpo”, uma peça “êmbolo”, uma peça “mola” e uma peça “tampa”. Existem três tipos de peças “corpo” (rosa, prata e preta sendo que o “corpo” prata é metálico e os outros são de material plástico), também, existem dois tipos de

peças “êmbolo” (preto e prata). Os produtos finais ou “peças montadas” podem ser de três tipos, dependendo das seguintes variáveis: “corpo” prata com “êmbolo” preto, “mola” e “tampa”; “corpo” rosa com “êmbolo” preto, “mola” e “tampa”; e “corpo” preto com “êmbolo” prata, “mola” e “tampa”. A seguir ilustram-se na Figura 5.2 as peças que compõem o produto.



Figura 5.2. Peças a serem montadas.

Para realizar a montagem deste produto o sistema é composto por:

⇒ Duas células de produção: Célula de entrada de material (I) e Célula de montagem (A) (é importante ressaltar que o sistema da FESTO prevê ainda uma célula de armazenagem (S)).

→ A célula de entrada de material (I) é composta pela estação de alimentação (Su) e a estação de teste (Te);

→ A célula de montagem (A) é composta pela estação de montagem (As) e a estação do robô (Ro);

⇒ Um sistema de transporte (T) que interliga as células de produção.

Além disso, cada uma destas estações possui dispositivos e equipamentos que efetuam as operações de carga/descarga, manipulação, verificação, armazenagem e transporte das peças a serem processadas. Para os dispositivos pneumáticos das estações é preciso de ar comprimido (ou energia pneumática) com uma pressão de funcionamento de 6 bar (600 kPa). Tanto estes dispositivos pneumáticos como os demais também precisam da alimentação de energia elétrica, que pode ser 220 V AC e/ou 380 V AC dependendo do dispositivo. A seguir é descrita cada uma das estações de trabalho com seus respectivos equipamentos e o sistema de transporte.

a) Estação de alimentação (Su)

Esta estação possui um depósito cilíndrico que armazena as peças “corpo” na qual serão montadas as outras peças (“êmbolo”, “mola” e “tampa”); o objetivo desta estação é retirar individualmente cada peça “corpo” do depósito e encaminhá-la para a estação de teste (Te). Para realizar esta operação, a estação (Su), conta com válvulas de controle, cilindros pneumáticos, sensor de vácuo, ventosa, sensores de posição e de presença. Esta estação envolve: o equipamento de armazenagem (depósito) e o equipamento de transferência (braço basculante).

- Equipamento de armazenagem

Este equipamento é utilizado para a armazenagem na forma de pilha de até 10 peças “corpo”, sendo que a alimentação das peças neste tipo de depósito é aleatória. Para extrair as peças da base do depósito é utilizado um pistão linear de dupla ação que retira uma peça do depósito e a posiciona para ser transferida pelo braço basculante. Quando o pistão está recuado, a peça está sendo posicionada e retida, e quando o pistão está estendido, a peça está sendo retirada do depósito. As posições finais do pistão são detectadas utilizando sensores magnéticos de proximidade. Além disso, o depósito conta com um sensor óptico de presença que está situado na base do depósito de peças (Figura 5.3).

- Equipamento de transferência

Este é um equipamento manipulador, isto é, um braço basculante acionado por um cilindro pneumático rotatório ou giratório (o nome depende do fabricante) e que pode ser ajustado para vários ângulos de deslocamento entre 0° e 180°. As posições finais são determinadas por micro-sensores fim-de-curso (Figura 5.3).

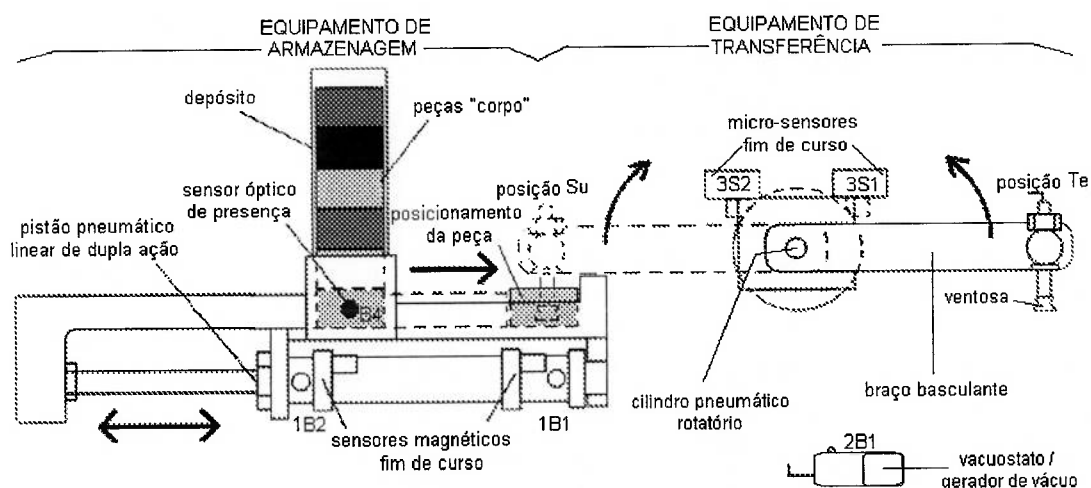


Figura 5.3. Diagrama esquemático da estação de alimentação.

Na extremidade livre do braço basculante tem-se uma garra com uma ventosa de aspiração para segurar ou pegar uma peça “corpo”. A aspiração é feita por um gerador de vácuo que utiliza o princípio de Venturi. O controle da aspiração é realizado por um vacuostato eletrônico ajustável que possui um pressóstato que regula o ponto de comutação. Os componentes da garra estão ilustrados na Figura 5.4.

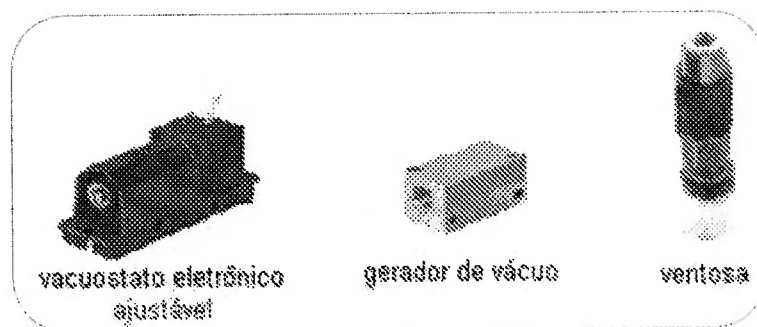


Figura 5.4. componentes da geração de vácuo.

b) Estação de teste (Te)

O objetivo desta estação é a identificação das características da peça “corpo” e o controle de qualidade dimensional desta peça. A estação de teste identifica as diversas propriedades da peça com a ajuda de um sensor óptico, um capacitivo e um indutivo. As principais partes desta estação são: o equipamento de reconhecimento, o equipamento de medição e o equipamento elevador.

- Equipamento de reconhecimento

Nesta parte é identificada a cor e o material da peça “corpo” com a ajuda de três sensores. O sensor capacitivo identifica a presença da peça com uma distância nominal de comutação ajustável entre 2 e 8 mm, ou seja, detecta se a peça (preta, prata ou rosa) está posicionada corretamente. O sensor óptico destina-se a identificar peças que refletem luz com uma distância nominal de comutação máxima de até 400 mm, ou seja, identifica se a peça é rosa ou prata, por serem cores claras. O sensor indutivo visa identificar a peça metálica, ou seja, identifica se a peça é prata ou não. A Figura 5.5 ilustra o posicionamento destes sensores.

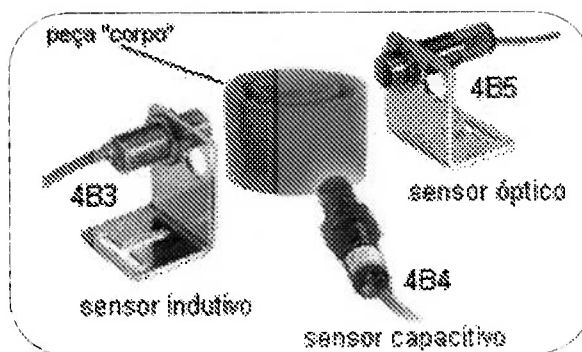


Figura 5.5. Sensores de teste da peça “corpo”.

- Equipamento de medição

Neste equipamento é medida a altura da peça “corpo” por meio de um sensor de deslocamento linear que está conectado a um instrumento comparador, permitindo assim a avaliação do resultado da medida. Este sensor trabalha com um deslocamento ajustável de até 400 mm, mas para o presente caso o intervalo de interesse que identifica uma peça com a altura dentro das especificações é de aproximadamente 25 mm com uma tolerância de ± 1 mm. A Figura 5.6 apresenta o sensor de deslocamento linear.

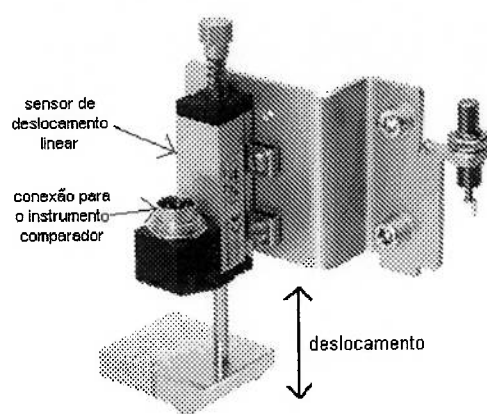


Figura 5.6. Sensor de medida.

- Equipamento elevador

Este equipamento transporta verticalmente a peça “corpo”. O deslocamento do elevador é feito por um cilindro sem haste de dupla ação. Na posição de baixo é identificada a cor e o material da peça pelo dispositivo de reconhecimento e na posição superior é avaliada a altura da peça pelo dispositivo de medição. Se a peça for considerada dentro das especificações será expulsa por uma rampa superior de modo que a peça é encaminhada para um *pallet* do sistema de transporte (T) e, se a peça for considerada fora das especificações será expulsa por uma rampa inferior para um depósito de peças rejeitadas. A Figura 5.7 ilustra este módulo.

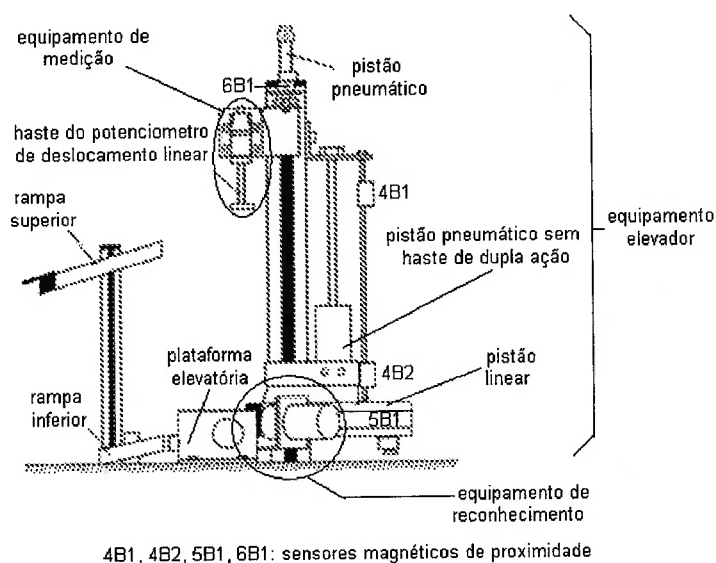


Figura 5.7. Equipamento elevador.

c) Estação do robô (Ro)

Esta estação é composta por um robô cartesiano modelo FESTO CAC 030 (FESTO, 2005) com três graus de liberdade. Os eixos móveis “X” e “Y” no plano horizontal são acionados por servo-motores com encoder (codificador) incremental e, o eixo móvel “Z” é acionado por um servo-motor, que é controlado através de sinais de sensores magnéticos de proximidade ilustrados na Figura 5.9. Na extremidade de trabalho do braço robótico tem-se uma garra pneumática giratória do tipo pinça que gira de 0 a 270 graus (Figura 5.9). Os componentes desta estação são ilustrados na Figura 5.8.

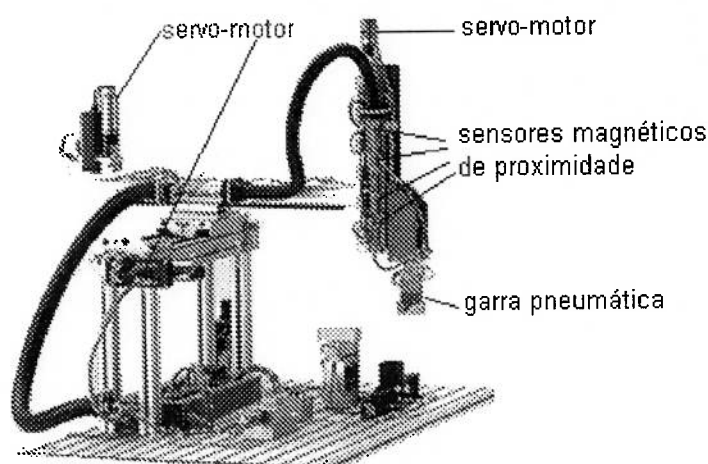


Figura 5.8. Componentes do dispositivo robô.

O deslocamento do braço robótico nos eixos X e Y visa o posicionamento horizontal para as tarefas de carregamento, descarregamento, transporte e montagem das peças “corpo”, “êmbolo”, “mola” e “tampa”, como também, o transporte do *pallet*. O deslocamento no eixo Z serve para que o robô efetue as tarefas de “pegar” as peças/*pallets* junto com o equipamento “garra giratória” que segura, solta ou gira as peça envolvida na montagem. As posições de montagem no plano horizontal são descritas na Tabela 5.1 e seu deslocamento está ilustrado Anexo A (Figura A.2).

Tabela 5.1. Posições em X e Y do braço robótico para montagem das peças.

número de posição	descrição das posições
2	braço robótico agarra ou deixa <i>pallet</i> da esteira
3	braço robótico agarra ou deixa <i>pallet</i> no dispositivo de retenção
4	braço robótico agarra êmbolo
5	braço robótico monta êmbolo
6	braço robótico agarra mola
7	braço robótico monta mola
8	braço robótico agarra tampa
9	braço robótico monta tampa
10	braço robótico agarra ou deixa <i>pallet</i> no dispositivo de fixação
11	braço robótico agarra ou deixa peça "corpo" do <i>pallet</i>

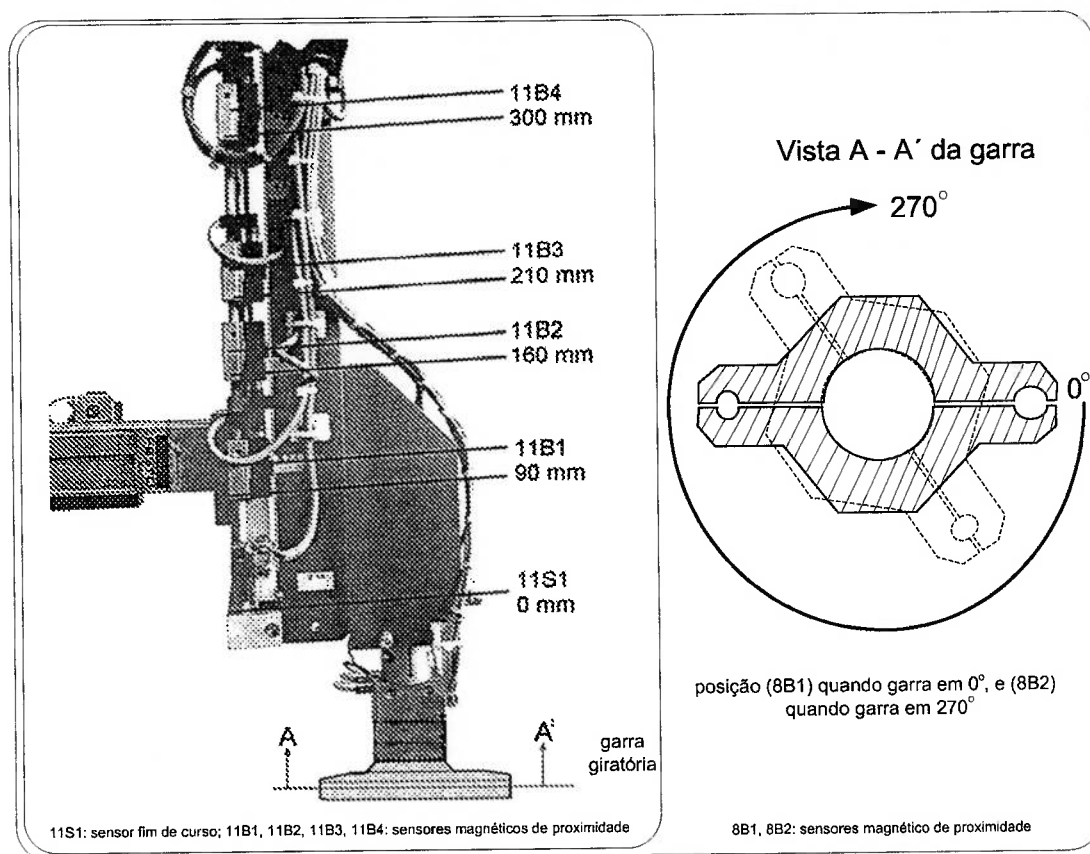


Figura 5.9. Posições do braço robótico no eixo Z e posições da garra.

d) Estação de montagem (As)

A estação de montagem esta acoplada com a estação do robô posicionando as partes para o processo de montagem. Na estação de montagem existem três depósitos contendo cada um deles um tipo de peça necessária para a montagem, estas peças são: os “êmbolos” (de cor preta ou prata), “molas” e “tampas”. Cilindros de dupla

ação retiram e posicionam as “tampas” e as “molas” dos seus respectivos depósito. Os “êmbolos” que estão empilhados num depósito duplo (um depósito para cada cor de “êmbolo”) são retirados e posicionados um de cada vez através de um cilindro pneumático rotativo. A presença de peças nos depósitos é monitorada por sensores ópticos. A estação de montagem possui cinco partes principais: depósito das “tampas”, depósito das “molas”, depósito dos “êmbolos”, equipamento de retenção e equipamento de fixação. Uma vista superior da estação de montagem é apresentada na Figura 5.10.

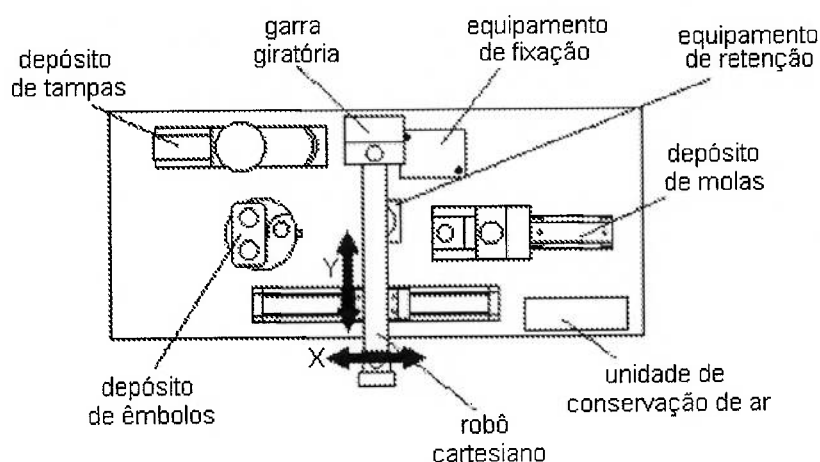


Figura 5.10 Estação de montagem (As)

- Equipamento de retenção
Este equipamento retém a peça “corpo”. Uma haste pressiona a peça “corpo” contra um suporte mecânico facilitando a montagem da “mola”, “êmbolo” e “tampa”.
- Equipamento de fixação
Este equipamento serve para apoiar a parte superior do *pallet* na estação de montagem enquanto dura a operação de montagem da peça final.

Na Figura 5.11 são apresentados quatro das cinco partes já descritas da estação de montagem.

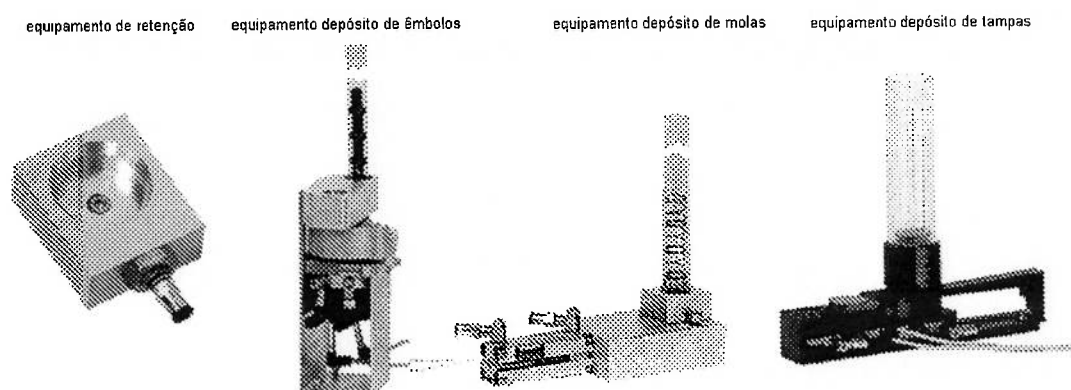


Figura 5.11. equipamentos da estação de montagem.

e) Sistema de Transporte (T)

Para a realização da movimentação de material entre as células há um conjunto de *pallets* transportadores sobre um circuito de via única. À medida que o produto é processado os *pallets* são requisitados pela célula correspondente. O fluxo da movimentação dos *pallets* entre as células de entrada de material e de montagem é ilustrado na Figura 5.12. Onde: T_x é a movimentação do *pallet* da célula (I) para a célula (A), T_y é a movimentação do *pallet* da célula (A) para a célula (S), e T_z é a movimentação do *pallet* da célula (S) para a célula (I).

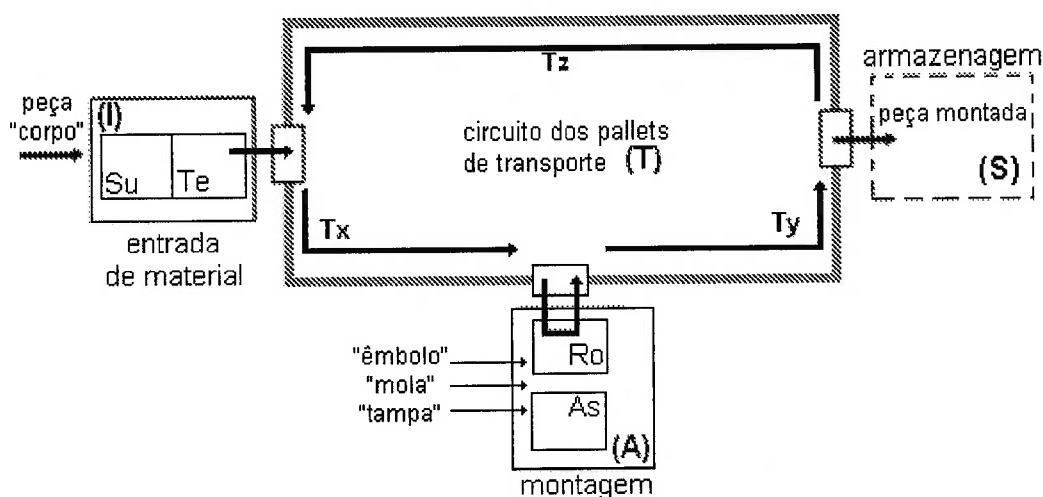


Figura 5.12. Fluxo de material entre as células

Depois de ter feito a descrição do sistema todo, segue a classificação do sistema flexível de montagem conforme a hierarquia de cinco níveis:

- nível 1 ou de fábrica: composto pelo sistema de montagem como um todo;
- nível 2 ou de células de produção: composto pelas células de entrada de material (I), montagem (A), e pelo sistema de transporte (T);
- nível 3 ou de estações de trabalho: composto pelas estações de alimentação (Su), de teste (Te), do robô (Ro) e de montagem (As);
- nível 4 ou de equipamentos: composto pelos equipamentos de armazenagem, de transporte, de retenção, de reconhecimento, de medição, elevador, e de fixação;
- nível 5 ou de dispositivos: composto na sua maioria pelos atuadores (válvula solenóides e servo-motores) e pelos sensores (magnéticos de proximidade, fim de curso, ópticos, indutivos, capacitivos, por encoders incrementais e vacuostatos).

Assim, na Figura 5.13 apresenta-se a pirâmide da hierarquia do FAS.

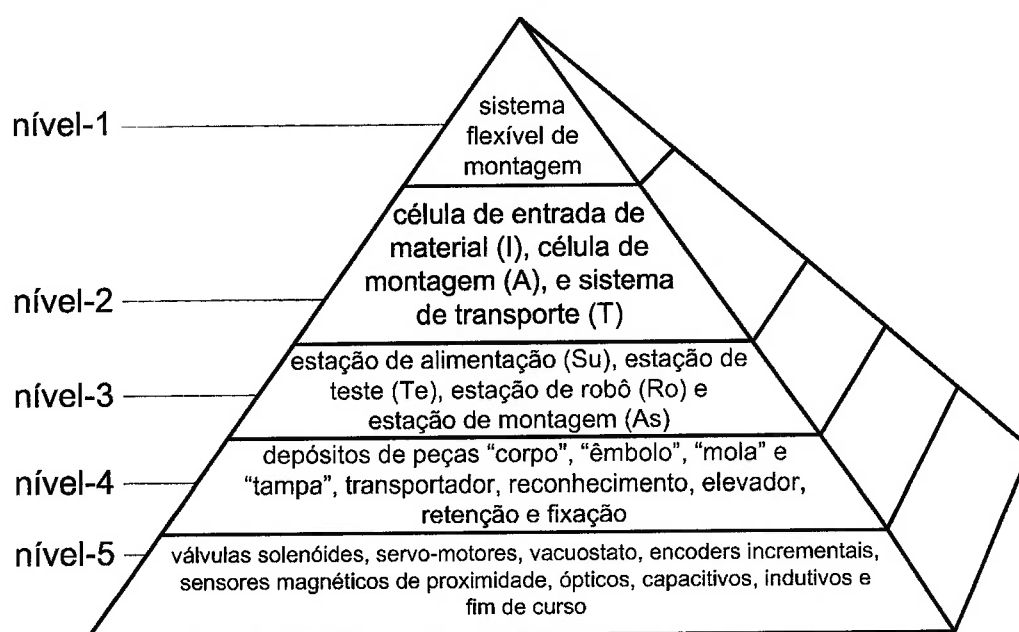


Figura 5.13 Hierarquia do sistema flexível de montagem.

2) Segundo passo: análise das funções

Neste passo identificam-se as operações que o sistema flexível de montagem e seus componentes executam. Para realizar este passo são identificadas e analisadas todas as funções do sistema. devido a grande quantidade de funções que compõem o sistema, a partir deste item serão apresentadas apenas as principais aplicações do método proposto, em especial, para a estação de robô (Ro) e especificamente para a

operação realizada quando a peça “tampa” é fixada na peça “corpo”. As outras funções do sistema estão no Anexo B.

A justificativa para ter escolhido esta função específica do braço robótico é primeiro pela importância que esta atividade tem na montagem do produto final, já que se não é realizada a fixação correta da peça “tampa” na peça “corpo” não se pode considerar o produto como devidamente montado.

Assim, neste passo são apresentados os diagramas das funções realizadas pelo robô relacionados com a função de fixar a “tampa” na peça “corpo”. Nestes diagramas o nível 1 representa as funções macro do sistema, o nível 2 representa as funções nas células de produção, e o nível 3 representa as funções das estações de trabalho (Figura 5.14), o nível 4 representa a função dos equipamentos para que o braço robótico realize a fixação da “tampa”, e o nível 5 representa as funções que realizam os dispositivos de detecção e de atuação (Figura 5.15).

Na Figura 5.14 observa-se que a função “montagem da peça final” e a função “alimentação de peças ‘mola’, ‘êmbolo’ e ‘tampa’” estão no nível 3 e fazem parte da função “montagem de material” que por sua vez é parte importante do processo de montagem.

A função “montagem da peça final” da Figura 5.14, está detalhada na Figura 5.15 onde pode-se observar que o nível 4 detalha as funções necessárias para compor as funções no nível 3, mas, para este exemplo somente é considerada a função “fixar peça ‘tampa’ na peça ‘corpo’”.

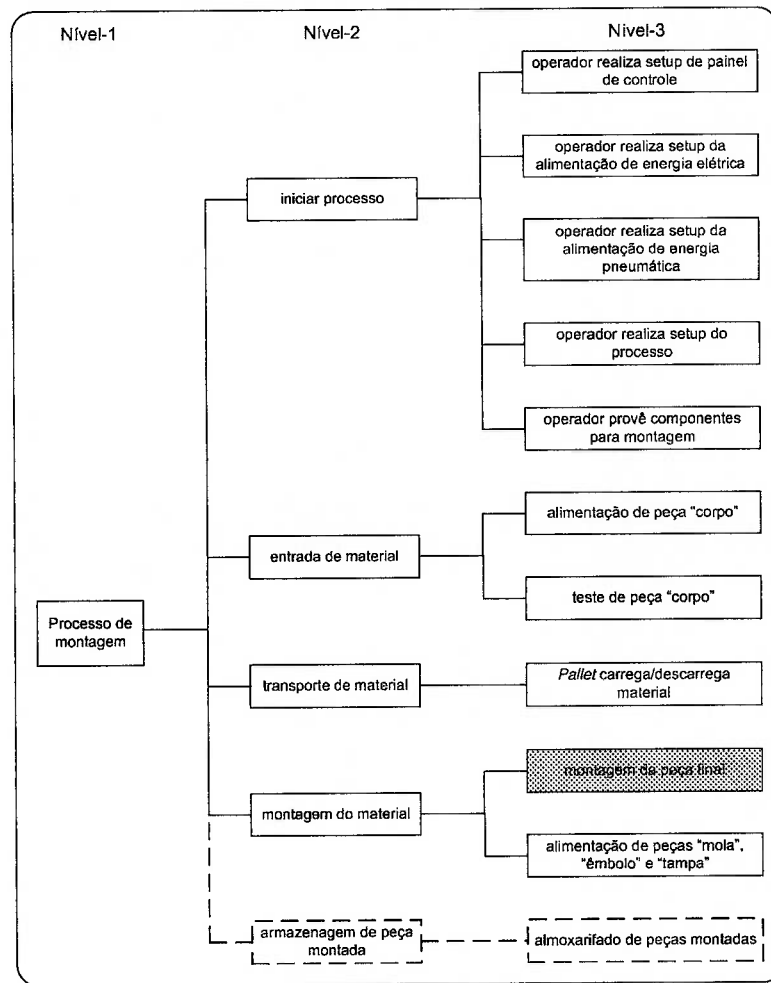


Figura 5.14. Diagrama das funções do sistema flexível de montagem.

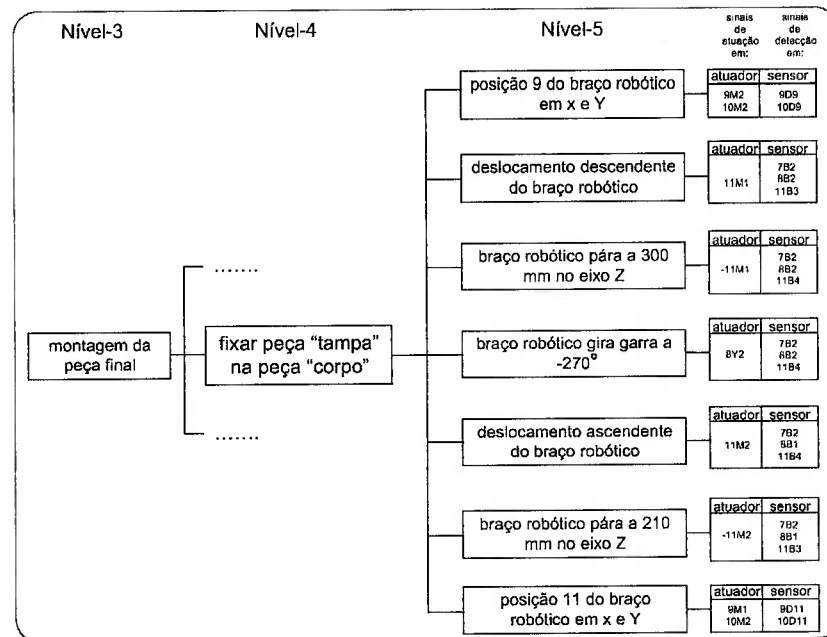


Figura 5.15. Diagrama das funções que compõem a função "fixar peça tampa na peça corpo".

3) Terceiro passo: fluxo de produção do sistema

Nos passos anteriores foram identificadas e classificadas as funções do sistema. A seguir define-se o fluxo de produção que deve ser realizado para tal, assim, são modeladas as funções usando a técnica do PFS que caracteriza se o fluxo de cada função é seqüencial, paralela ou se apresenta conflitos de entrada ou de saída. A seguir são modeladas as funções envolvidas na fixação da peça “tampa” na peça “corpo”, realizada pelo robô (da Figura 5.16 até a Figura 5.20, o restante dos modelos em PFS do sistema estão em Anexo B).

A Figura 5.16 é um modelo geral e macro do sistema que identifica os recursos envolvidos para realizar a montagem do produto.

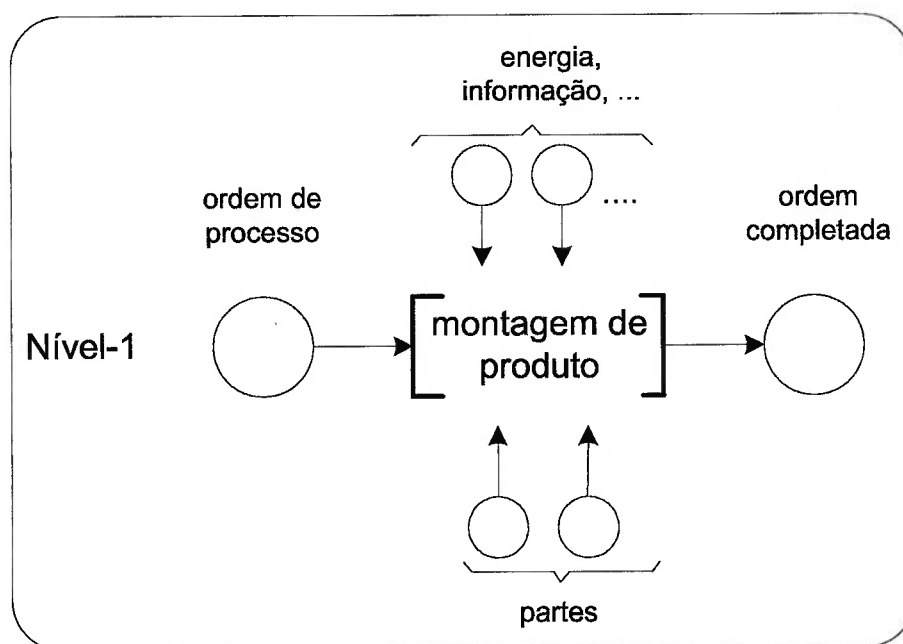


Figura 5.16. PFS do sistema flexível de montagem

A Figura 5.17 detalha o fluxo e as atividades entre o início do processo e a operação de cada célula de produção, considerando que entre cada célula de produção existe a participação do sistema de transporte de transporte.

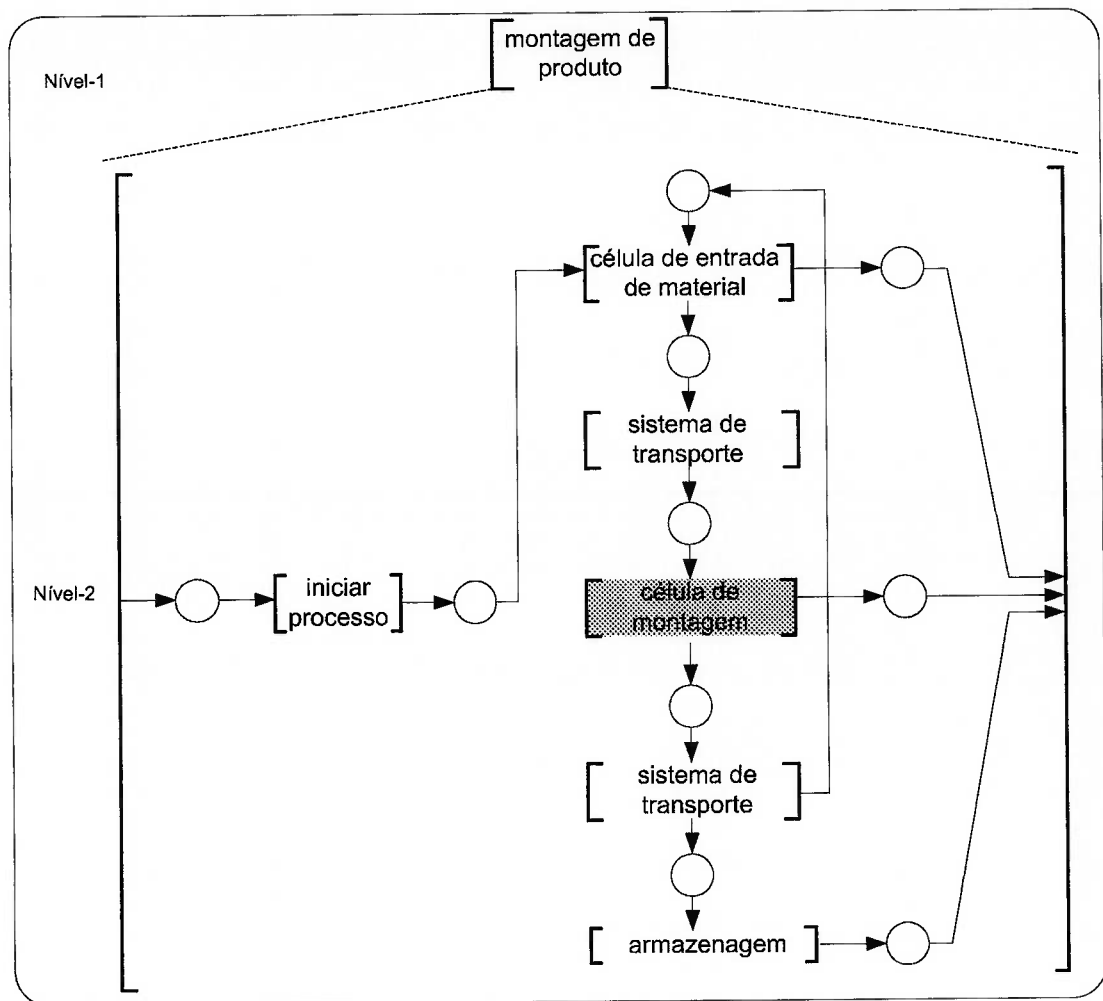


Figura 5.17. PFS das células de produção do Sistema Flexível de montagem.

Na Figura 5.18 é detalhada somente a célula de montagem (A), observando que esta é composta pela estação do robô (Ro) e pela estação de montagem (As), sendo que as atividades envolvem situações de paralelismo e sincronização no seu fluxo de produção.

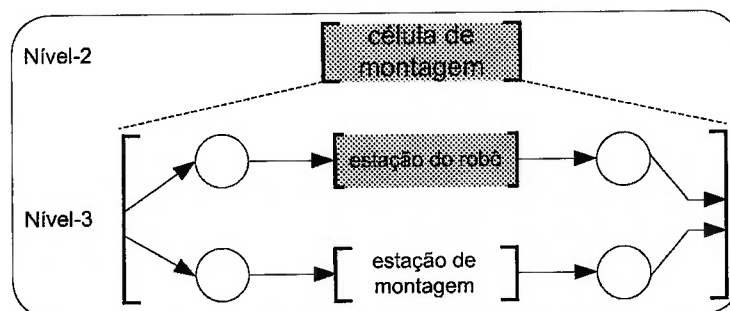


Figura 5.18. Detalhamento em PFS da célula de montagem (A).

Na Figura 5.19 são modeladas todas as atividades realizadas pelo braço robótico da estação (Ro).

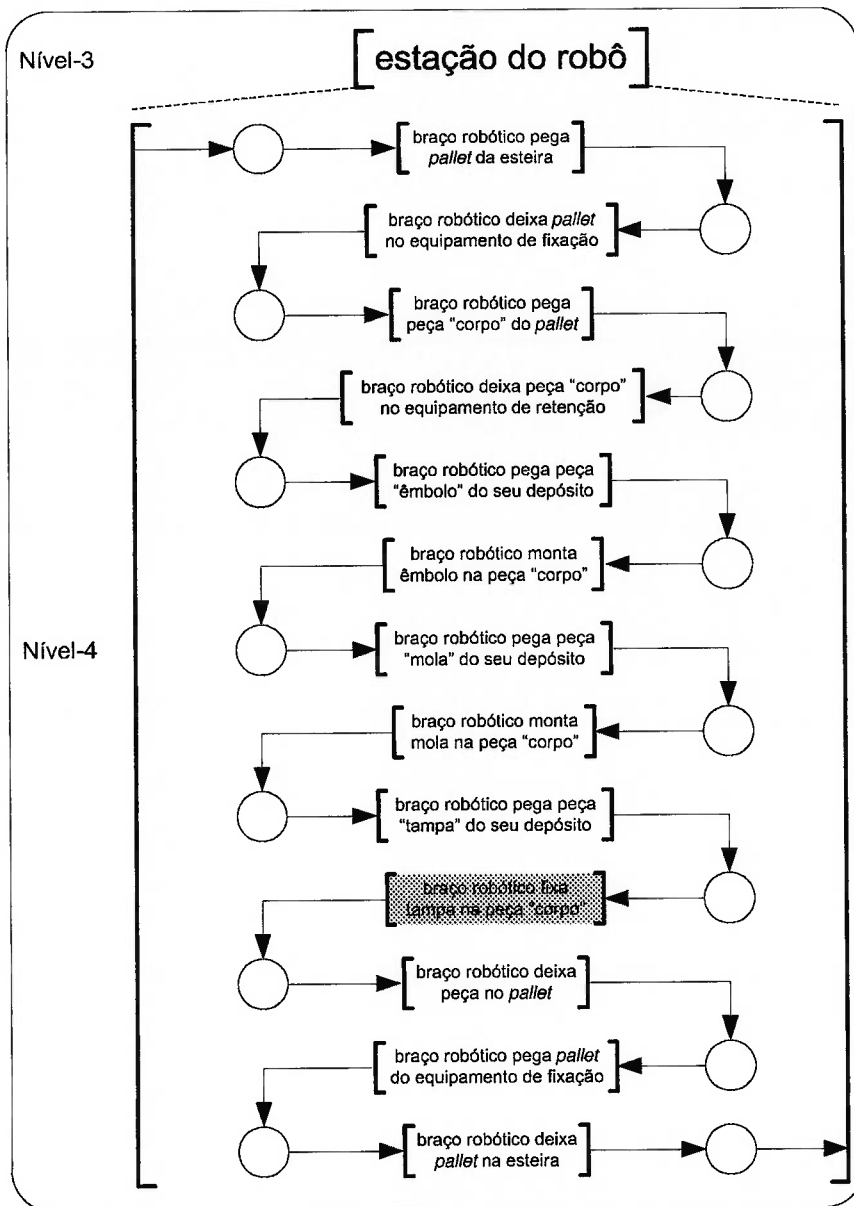


Figura 5.19. Detalhamento em PFS das operações do braço robótico.

Na Figura 5.19 antes da função “braço robótico fixa tampa na peça ‘corpo’” existe a função “braço robótico pega peça ‘tampa’ do seu depósito”, isto é, a garra está fechada e está com a peça “tampa”. Assim, na função de “fixar tampa na peça ‘corpo’” considera-se ainda a garra fechada até o final desta operação porque logo após a fixação, o braço robótico transporta a peça montada até o *pallet*.

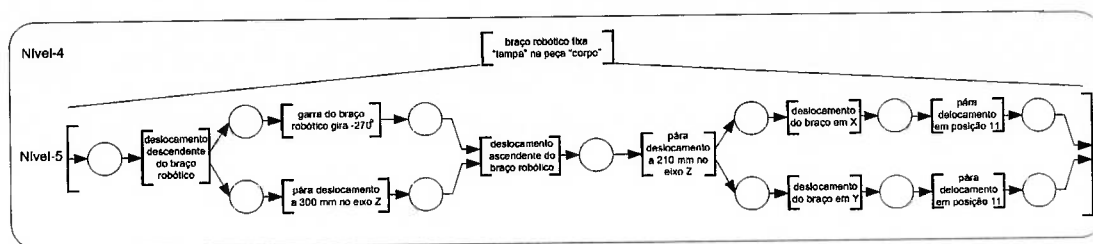


Figura 5.20. Detalhamento em PFS da operação fixar “tampa”.

4) Quarto passo: listagem dos dispositivos

Neste passo identifica-se os dispositivos e suas respectivas funções (vide Tabela 5.2 a Tabela 5.4). Na Tabela 5.3, as válvulas têm uma codificação adicional onde, por exemplo, válvula com código 7.2 significa que o número do equipamento ao que pertence é 7; e a ação que realiza a válvula com o cilindro é o número 2 (números pares indicam haste estendida e número ímpares haste recuada).

Tabela 5.2. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (Ro).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
7A	agarra o <i>pallet</i> e as peças para montagem	cilindro pneumático de dupla ação
8A	gira a garra de 0° a 270°	cilindro pneumático giratório de dupla ação
9A	movimenta o braço robótico no eixo X	braço robótico em X
10A	movimenta o braço robótico no eixo Y	braço robótico em Y
11A	movimenta o braço robótico no eixo Z	braço robótico em Z

Tabela 5.3. Lista dos dispositivos de atuação da estação (Ro).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
7Y1	altera estado da válvula ⁺ 7.2 para posição de garra aberta	válvula solenóide
7Y2	altera estado da válvula ⁺ 7.4 para posição de garra fechada	válvula solenóide
8Y1	altera estado da válvula ⁺ 8.2 para posição de garra em 0° ou -270°	válvula solenóide

⁺ válvula de 5/2 vias acionada por solenóide e retorno por solenóide

8Y2	altera estado da válvula ⁺ 8.4 para posição de garra a 270°	válvula solenóide
9M1	altera giro do motor 9A para sentido horário (deslocamento no eixo X)	servo-motor
9M2	altera giro do motor 9A para sentido anti-horário (deslocamento no eixo X)	servo-motor
10M1	altera giro do motor 10A para sentido horário (deslocamento no eixo Y)	servo-motor
10M2	altera giro do motor 10A para sentido anti-horário (deslocamento no eixo Y)	servo-motor
11M1	altera giro do motor 11A para sentido horário (deslocamento no eixo Z)	servo-motor
11M2	altera giro do motor 11A para sentido anti-horário (deslocamento no eixo Z)	servo-motor

Tabela 5.4. Lista dos dispositivos de detecção da estação (Ro).

nomenclatura	Função	tipo de dispositivo
7B1	detecta garra aberta do braço robótico	sensor magnético de proximidade
7B2	detecta garra fechada do braço robótico	sensor magnético de proximidade
8B1	detecta ter girado garra do braço robótico em sentido anti-horário a 0°	sensor magnético de proximidade
8B2	detecta ter girado garra do braço robótico em sentido horário a 270°	sensor magnético de proximidade
9D2	detecta posição do braço robótico no eixo X que agarra ou deixa <i>pallet</i> da esteira	encoder (codificador) incremental

10D2	detecta posição do braço robótico no eixo Y que agarra ou deixa <i>pallet</i> da esteira	encoder (codificador) incremental
9D3	detecta posição no eixo X que deixa peça "corpo" no dispositivo de retenção	encoder (codificador) incremental
10D3	detecta posição do braço robótico no eixo Y que deixa peça "corpo" no dispositivo de retenção	encoder (codificador) incremental
9D4	detecta posição do braço robótico no eixo X que agarra "êmbolo" do depósito de êmbolos	encoder (codificador) incremental
10D4	detecta posição do braço robótico no eixo Y que agarra "êmbolo" do depósito de êmbolos	encoder (codificador) incremental
9D5	detecta posição do braço robótico no eixo X que monta "êmbolo" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
10D5	detecta posição do braço robótico no eixo Y que monta "êmbolo" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
9D6	detecta posição do braço robótico no eixo X que agarra "mola" do depósito de molas	encoder (codificador) incremental
10D6	detecta posição do braço robótico no eixo Y que agarra "mola" do depósito de molas	encoder (codificador) incremental
9D7	detecta posição do braço robótico no eixo X que monta "mola" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
10D7	detecta posição do braço robótico no eixo Y que monta "mola" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
9D8	detecta posição do braço robótico no eixo X que agarra "tampa" do depósito de tampas	encoder (codificador) incremental
10D8	detecta posição do braço robótico no eixo Y que agarra "tampa" do depósito de tampas	encoder (codificador) incremental

9D9	detecta posição do braço robótico no eixo X que monta “tampa” na peça “corpo”	encoder (codificador) incremental
10D9	detecta posição do braço robótico no eixo Y que monta “tampa” na peça “corpo”	encoder (codificador) incremental
9D10	detecta posição do braço robótico no eixo X que deixa ou agarra <i>pallet</i> do dispositivo de fixação	encoder (codificador) incremental
10D10	detecta posição do braço robótico no eixo Y que deixa ou agarra <i>pallet</i> dispositivo de fixação	encoder (codificador) incremental
9D11	detecta posição do braço robótico no eixo X que deixa ou agarra peça “corpo” do <i>pallet</i>	encoder (codificador) incremental
10D11	detecta posição do braço robótico no eixo Y que deixa ou agarra peça “corpo” do <i>pallet</i>	encoder (codificador) incremental
11B1	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 90 mm	sensor magnético de proximidade
11B2	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 160 mm	sensor magnético de proximidade
11B3	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 210 mm	sensor magnético de proximidade
11B4	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 300 mm	sensor magnético de proximidade
11S1	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 0 mm	sensor fim de curso
11S2	detecta posição do braço robótico no eixo Z com valor maior a 300 mm	sensor fim de curso

As figuras esquemáticas que ajudam a entender estas tabelas estão no item 5.1 (Figura 5.8, 5.9) e no Anexo A (Figura A.2).

Da mesma forma que nos outros passos, as tabelas dos dispositivos das outras estações estão no Anexo B.

5.2. Interação dos dispositivos do sistema flexível de montagem

Na etapa anterior foram identificadas e classificadas as funções que depois foram ordenadas conforme o fluxo que exige cada operação do sistema flexível de montagem. Assim, a estrutura das funções está determinada, sendo que nesta etapa o foco é a dinâmica do sistema. As funções são assim modeladas e integradas usando a técnica do MFG com apoio do software HPSim.

Como já foi detalhado no capítulo anterior a modelagem em MFG seguiu 3 passos:

1. para o módulo da realização do controle substituem-se os grafos da Figura 5.20 em PFS pelos grafos em MFG. Este modelo fica desenhado na cor verde.
2. para o módulo dos atuadores primeiro identifica-se os atuadores da estação do robô que realizam a operação de fixação da “tampa”. Utiliza-se assim os dados da Tabela 5.3, no caso, tem-se o servo-motor em sentido horário e anti-horário para subir e descer no eixo Z (11M1 e 11M2), e para o deslocamento do braço robótico em X, Y os servo-motores (10M2 e 9M1) em sentido anti-horário e horário, respectivamente. Para girar a garra do braço, ou seja, fixar a “tampa” na peça “corpo” tem-se as servo válvulas (8Y1 e 8Y2) que realizam o giro de 0° ou 270°, respectivamente.
3. com base nos dados da Tabela 5.4 tem-se os sensores que participam na estação (Ro), sendo: sensores de proximidade magnética (7B1, 7B2, 8B1, 8B2, 11B1, 11B2, 11B3 e 11B4) e encoders incrementais para as posições (9D9, 10D9, 9D11 e 10D11). Os sensores fim de curso (11S1 e 11S2) não são considerados, já que estes sensores são apenas para detectar situações críticas e interromper as funções desta estação.

Os estados dos sensores são modelados com BOXES e ligados às TRANSIÇÕES devidas do módulo da realização do controle através de *portas habilitadoras ou inibidoras*.

Os estados dos atuadores são modelados com BOXES e TRANSIÇÕES sendo que estes recebem *portas habilitadoras e inibidoras* oriundas do módulo de realização do controle que é responsável por ativar/desativar os atuadores.

Assim, gerado o modelo em MFG (Figura 5.21), a interação entre os módulos de controle pode ser analisada através de simulação. Depois de simulado o processo nominal são obtidas MARCAÇÕES do braço robótico quando executa a tarefa de fixar a “tampa”. A Tabela 5.5 apresenta as MARCAÇÕES nominais obtidas depois de executar a simulação.

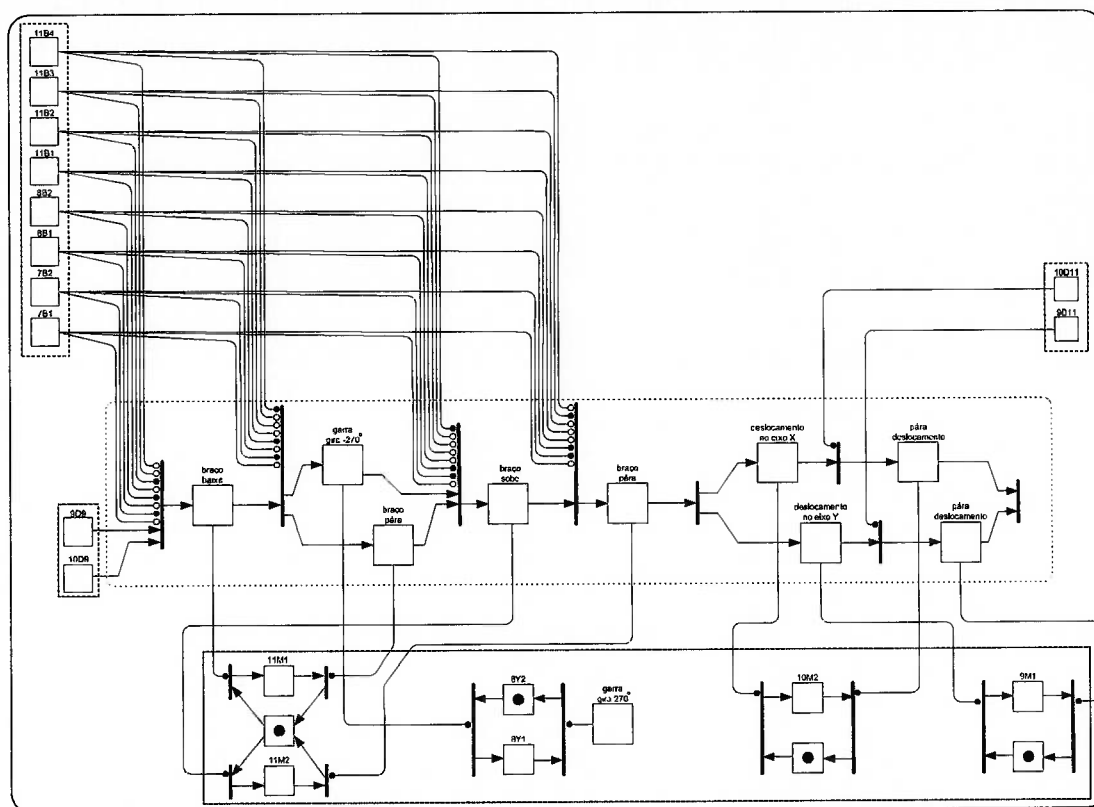


Figura 5.21. Interação dos dispositivos para fixar “tampa”

Tabela 5.5. MARCAÇÕES nominais do braço robótico para fixar “tampa”.

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle										dispositivo de atuação						dispositivo de detecção											
	P ₂	P ₃	P _{ESC}	P _{POS}	P _{REV}	P _{REV}	P _{REV}	P _{REV}	P _{REV}	P _{REV}	P _{REV}	P _{110A2}	P _{110A1}	P _{110A2}	P _{110A1}	P _{110A2}	P _{110A1}	P _{110A2}	P _{110A1}	P _{110A2}	P _{110A1}	P _{110A2}	P _{110A1}	P _{110A2}	P _{110A1}	P _{110A2}		
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
braço robótico gira -270° e fecha garra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
braço robótico pára subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
pára deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

g+ = garra gira 270 graus; g- = garra gira -270 graus; dX- = deslocamento negativo no eixo X; pdX = pára deslocamento em X; dY+ = deslocamento positivo no eixo Y; pdY = pára deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço pára; 9D9 e 10D9 = D9; 9D11 e 10D11 = D11

5.3. Detecção de falhas do sistema flexível de montagem

Com o resultado dos passos e etapas anteriores tem-se o modelo estruturado e dinâmico do funcionamento do sistema flexível de montagem. No caso, foi ilustrada a tarefa de fixar “tampa” na peça “corpo”, executado pelo braço robótico. Na presente etapa, os modelos são então utilizados para caracterizar as possíveis falhas, o que é realizado através dos seguintes passos:

a) Indução de falhas

A indução de falhas considera inicialmente as MARCAÇÕES dos sensores no cenário sem falhas, isto é os dados da Tabela 5.5 da etapa anterior. Assim, a MARCAÇÃO inicial do módulo dos detectores é $\{p_{7B1}, p_{7B2}, p_{8B1}, p_{8B2}, p_{9D9}, p_{10D9}, p_{9D11}, p_{10D11}, p_{11B1}, p_{11B2}, p_{11B3} \text{ e } p_{11B4}\} = \{0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0\}$, ou seja, pode-se entender que há sinal em $\{p_{7B1}, p_{8B2}, p_{9D9}, p_{10D9}, p_{11B2}\} = \{1, 1, 1, 1, 1\}$ e que não há sinal em $\{p_{7B2}, p_{8B1}, p_{9D11}, p_{10D11}, p_{11B1}, p_{11B3}, p_{11B4}\} = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$, sinais que representam as condições iniciais do processo de fixação da “tampa”.

Assim, a indução de falhas consiste em alterar estas MARCAÇÕES nominais. Por exemplo, a MARCAÇÃO em $p_{8B2} = \{1\}$ é alterada para $\{0\}$. Feita esta alteração na MARCAÇÃO a simulação do modelo é novamente executada. Entretanto, o modelo neste caso fica travado e se obtém a Tabela 5.6.

Tabela 5.6. MARCAÇÃO com falha induzida em 8B2.

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle									dispositivo de atuação					dispositivo de detecção													
	P _{ex}	P _{ey}	P _{ex}	P _{ey}	P _{ex}	P _{ey}	P _{ex}	P _{ey}	P _{ex}	P _{ey}	P _{8B1}	P _{8B2}	P _{11B1}	P _{11B2}	P _{7B1}	P _{7B2}	P _{3B1}	P _{3B2}	P _{2B1}	P _{2B2}	P _{1B1}	P _{1B2}	P _{10B1}	P _{10B2}	P _{11B1}	P _{11B2}	P _{11B1}	P _{11B2}
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico desce																												

Neste caso foi retirada uma MARCA que representa o sinal no sensor 8B2 que indica a posição devida da garra do robô. Isto é, como essa condição não é satisfeita o robô não executa o passo seguinte. Outra indução de falha seria ao invés de retirar um sinal, acrescentar um sinal, por exemplo, a MARCAÇÃO em $p_{11B1} = \{0\}$ é alterada para $\{1\}$. Feita esta alteração a simulação é novamente executada e também neste caso sua evolução é travada e se obtém a Tabela 5.7 que indica que a posição do robô no eixo Z não atende as condições para passar ao próximo passo.

Tabela 5.7. MARCAÇÃO com falha induzida em 11B1.

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle									dispositivo de atuação					dispositivo de detecção														
	P _{ex}	P _{ey}	P _{ex}	P _{ey}	P _{ex}	P _{ey}	P _{ex}	P _{ey}	P _{ex}	P _{ey}	P _{8B1}	P _{8B2}	P _{11B1}	P _{11B2}	P _{7B1}	P _{7B2}	P _{3B1}	P _{3B2}	P _{2B1}	P _{2B2}	P _{1B1}	P _{1B2}	P _{10B1}	P _{10B2}	P _{11B1}	P _{11B2}	P _{11B1}	P _{11B2}	
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
braço robótico desce																													

É importante ressaltar que a indução de falhas nas MARCAS dos BOXES é realizada no modelo do sistema que é utilizado pelo software de simulação. Assim, o processo de indução de falhas consiste em alterar parâmetros do modelo no software de simulação relacionados com a manipulação de MARCAS nos BOXES que representam os sensores.

b) Comparação de dados e detecção de falhas

As tabelas obtidas no passo anterior são então comparadas com a Tabela 5.5 que apresenta as MARCAÇÕES nominais do processo. Já que a detecção de falhas envolve o módulo dos detectores, então são comparadas somente as MARCAS dos sensores do módulo dos detectores.

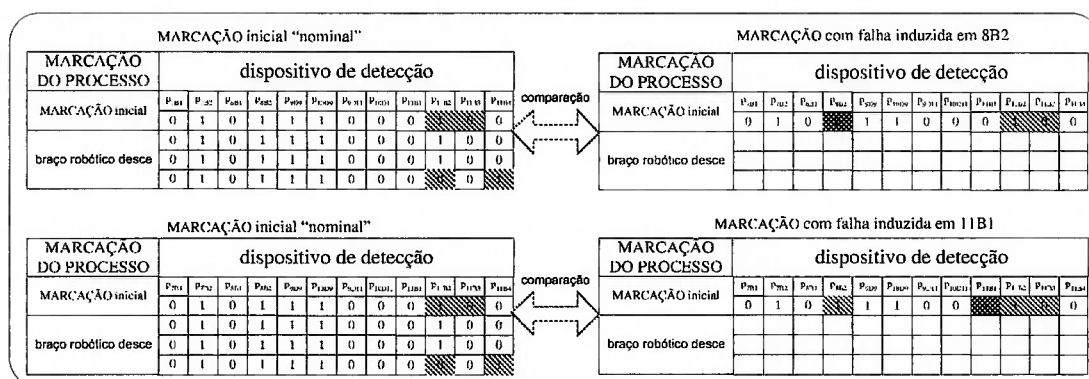


Figura 5.22. Comparação dos dados nominais com os induzidos a falha

Para o primeiro exemplo e com a ajuda da Tabela 5.4 verifica-se um problema que foi sinalizado por 8B2 com falha, sendo que este está associado ao sensor magnético de proximidade que detecta se a garra girou 270° . Então, a hipótese da falha é que o sensor está danificado ou que a garra não girou por causa da servo válvula danificada ou por falhas no equipamento mesmo.

Para o segundo exemplo e também com a ajuda da Tabela 5.4 verifica-se um problema que foi sinalizado por 11B1, sendo que este está associado ao sensor magnético de proximidade instalado no eixo Z do robô e que determina se o braço robótico está a 90 mm no eixo Z. Portanto, a hipótese levantada sobre esta falha é que se há sinal em 11B1 (90 mm em Z) e também há sinal em 11B2 (160 mm em Z) pode ser que um destes sensores esteja danificado ou com posição incorreta, já que o braço não pode estar em duas posições distintas ao mesmo tempo.

As hipóteses levantadas ajudam a tratar a falha dentro do entorno que envolve o sinal induzido do sensor e evita uma análise geral no sistema para identificar a falha.

Tanto no primeiro como no segundo exemplo foram detectadas falhas através de dados obtidos na simulação do modelo, para depois localizar o dispositivo que sinalizou problemas. Assim pode-se concluir que o módulo que representa a realização do controle só evolui com suas funções predeterminadas se as MARCAS dos sensores que condicionam o mesmo estão corretas. Assim, o método proposto para a modelagem de FAS garante que os processos serão executados corretamente

sem apresentar defeitos, já que os problemas nos dispositivos são detectados na sua fase inicial.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho introduz um método para modelagem de sistemas flexíveis de montagem (FAS) através de uma abordagem de Sistemas a Eventos Discretos (SED) e rede de Petri (PN) considerando, além da descrição dos processos nominais, a detecção de falhas.

O método proposto, na primeira etapa identifica a função de cada parte dos FAS e determina a hierarquia destas funções. Além disso, define a nomenclatura e as características técnicas dos dispositivos envolvidos nos FAS. Identifica-se também o fluxo das funções dos processos envolvidos nos FAS através da técnica do PFS (extensão da PN).

O método que é baseado na caracterização do fluxo das funções, realiza na segunda etapa a descrição da dinâmica dos processos do sistema através da técnica MFG. Assim, além de estruturar a modelagem de um sistema, este método detalha e identifica claramente o fluxo das funções do sistema em condições nominais (sem ocorrência de falhas).

Os dados dos modelos do sistema são então armazenados em tabelas que apresentam todos os estados e condições que determinam assim, passo a passo, a evolução de cada função que realiza um determinado processo de montagem. Com base nestes dados armazenados são consideradas duas técnicas de detecção de falhas: (a) a baseada na história do processo, que é usada para a modelagem e posterior armazenagem dos dados do sistema quando este funciona corretamente, e (b) a baseada no modelo do processo, que adapta a técnica da geração de resíduos para a indução de falhas. Estas duas técnicas são combinadas na terceira etapa do método, para assim detectar as falhas e localizar o ou os dispositivos envolvidos com tal falha.

Tendo localizado o dispositivo que sinalizou o problema podem ser elaboradas hipóteses em relação à ocorrência e origem de tal problema. Assim, a hipótese levantada está focada em relação ao atuador ou atuadores e objeto de controle que influenciam o sinal do(s) sensor(es) envolvidos.

Por outro lado, com a elaboração deste trabalho comprovou-se que a técnica PFS/MFG é efetiva para a descrição sistemática de processos. Mostrando um potencial de redução ao esforço no desenvolvimento e análise de modelos para sistemas industriais.

Assim, considera-se que o trabalho desenvolvido é uma contribuição relevante para a implementação de uma interface entre o modelo em PN (PFS/MFG) com o objeto de controle (equipamento) em tempo real. Além disso, após a caracterização das formas de comunicação dos modelos que descrevem a realização de controle com o equipamento podem ser estudados protocolos que garantam a transmissão de dados através de protocolos tais como o EDI (*Electronic Data Interchange*) que realiza a transferência eletrônica de tabelas. Ou seja, a permuta de tabelas entre computadores sem trânsito de papéis (ALTOVA, 2006); (ARUNACHALAM, 2004); (MACHUCA; BARAJAS, 2004); (MEADORS, 2005).

Posteriormente, e partindo destes avanços, podem ser desenvolvidas técnicas para o diagnóstico, tratamento e isolamento de falhas o que garantam maior autonomia e maior flexibilidade dos FAS.

ANEXO A

A.1. Códigos usados IEC 61346-2:2000-12

Para este trabalho foram identificados seis códigos de dispositivos que serão usados:

A = grupos construtivos parciais ou agrupamento de dispositivos que formam uma unidade construtiva, mas que não podem alocar-se claramente a outro tipo de letra indicadora (código).

B = dispositivo que converte sinal não elétrico para elétrico e vice-versa, como sensores de proximidade, transdutor de deslocamento.

D = dispositivo de memória.

S = interruptor seletor: sensores fim de curso, comutador.

Y = dispositivos mecânicos de acionamento elétrico: válvulas pneumáticas.

M = motores.

A.2. Diferenças entre HPSim e MFG

No software HPSim os ARCOS têm a mesma representação gráfica que no MFG, já os ARCOS habilitadores e inibidores possuem outra representação gráfica, mas com os mesmos princípios das *portas inibidoras* e *habilitadoras* do MFG. Na Figura 4.9 é ilustrada a equivalência dos ARCOS no software HPSim com as *portas* do MFG. Outro detalhe a destacar neste software é que os BOXES são desenhados como círculos.

no HPSIM	no MFG
ARCO →	ARCO →
arco habilitador →	<i>porta habilitadora</i> ●
arco inibidor ●	<i>porta inibidora</i> ○

Figura A.1. Comparação de ARCOS do HPSim com o MFG.

A.3. Deslocamento do braço robótico nos eixos X e Y

Na Figura A.2 é apresentado, desde o plano superior, o deslocamento do braço robótico no eixo X e Y para poder cumprir com as posições de montagem. Além disso, ilustra-se o giro anti-horário ou horário que realizam os servo-motores para deslocar-se. Na figura, por exemplo, D9 representa o ponto da posição 9 feita pelo deslocamento em X e Y. A unidade de medida em Y e X é mm.

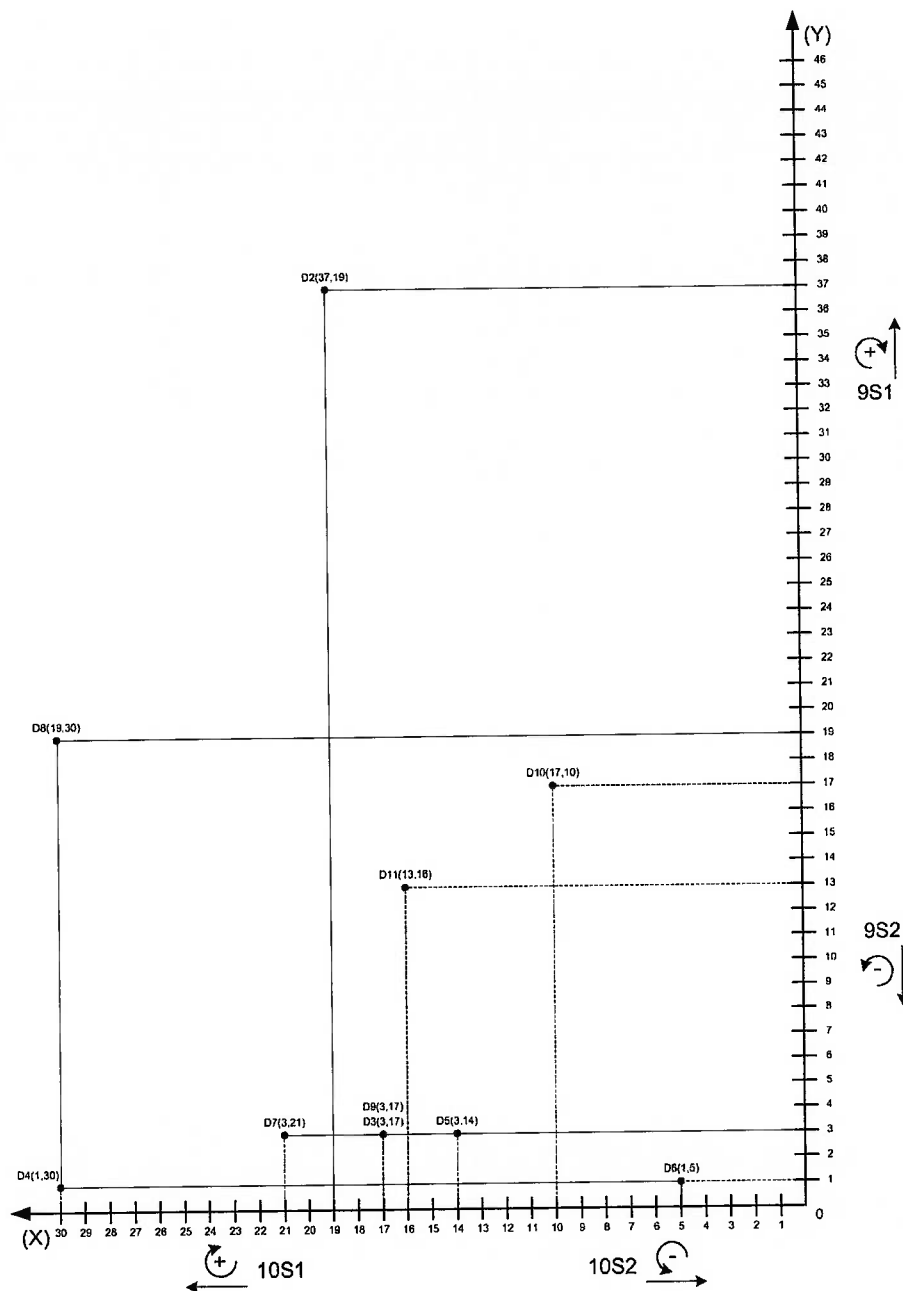


Figura A.2. Deslocamento do braço robótico em X e Y.

ANEXO B

B.1. Análise das funções do FAS.

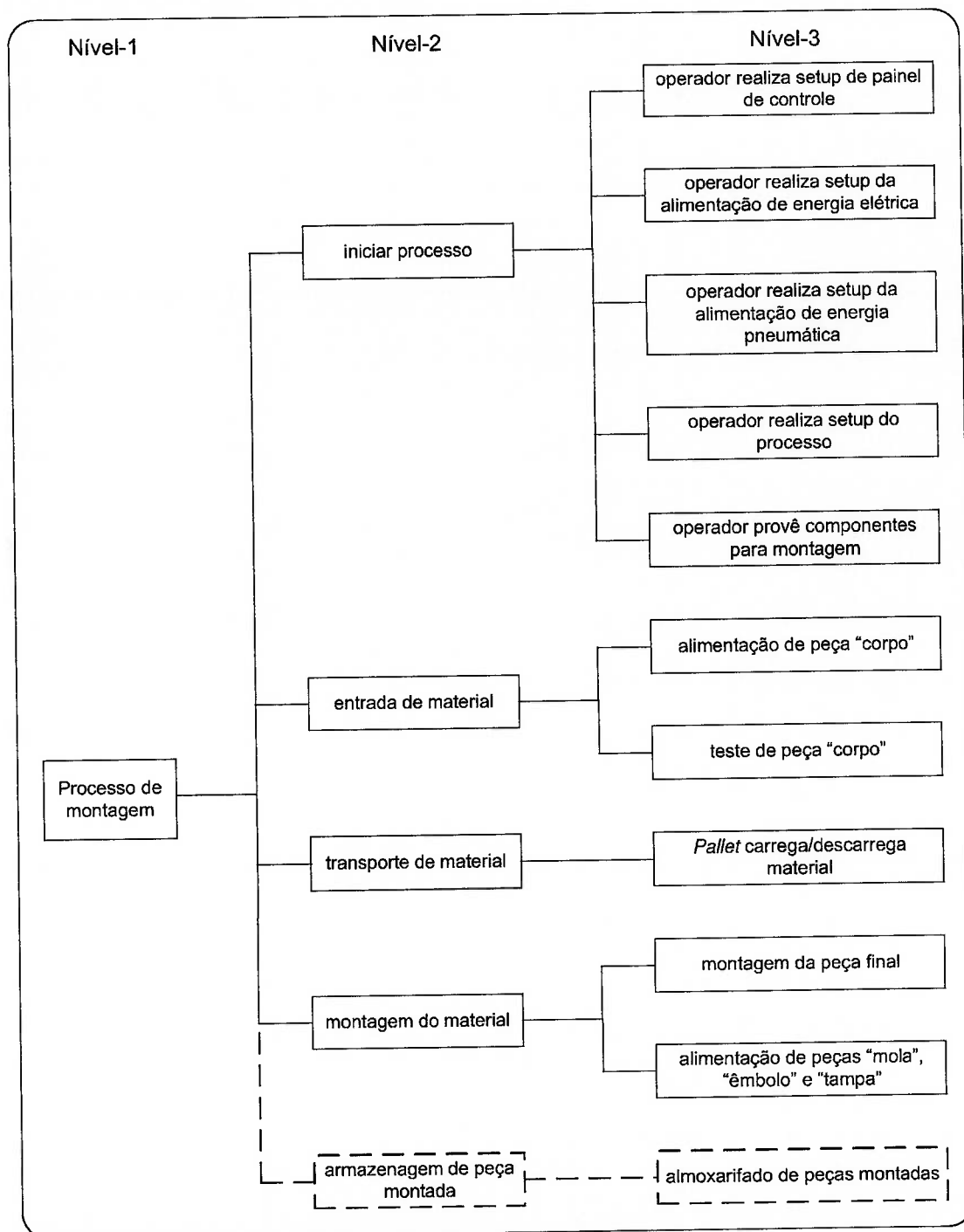


Figura B.1. Diagrama das funções do FAS.

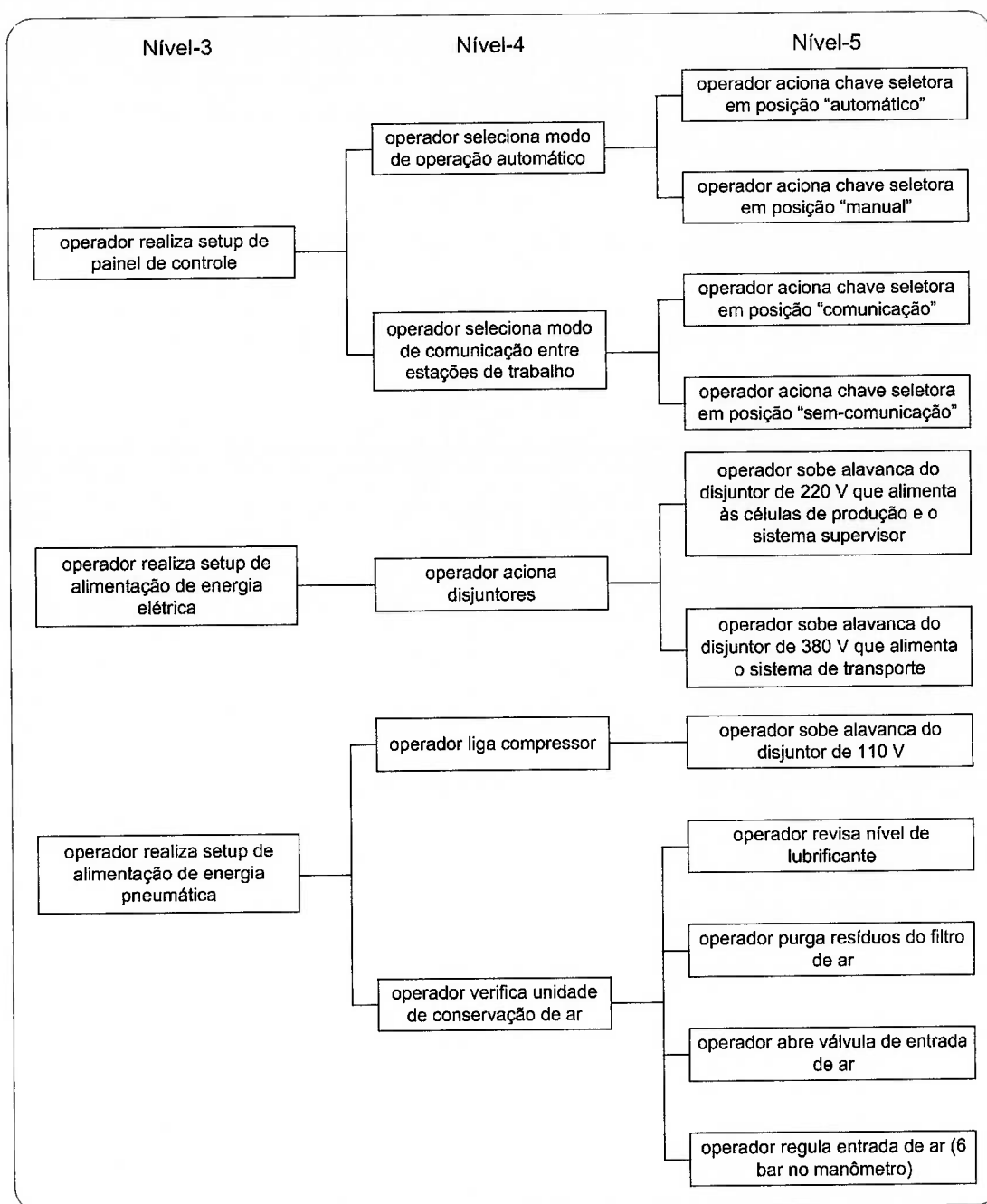


Figura B.2. Diagrama das funções do início do processo.

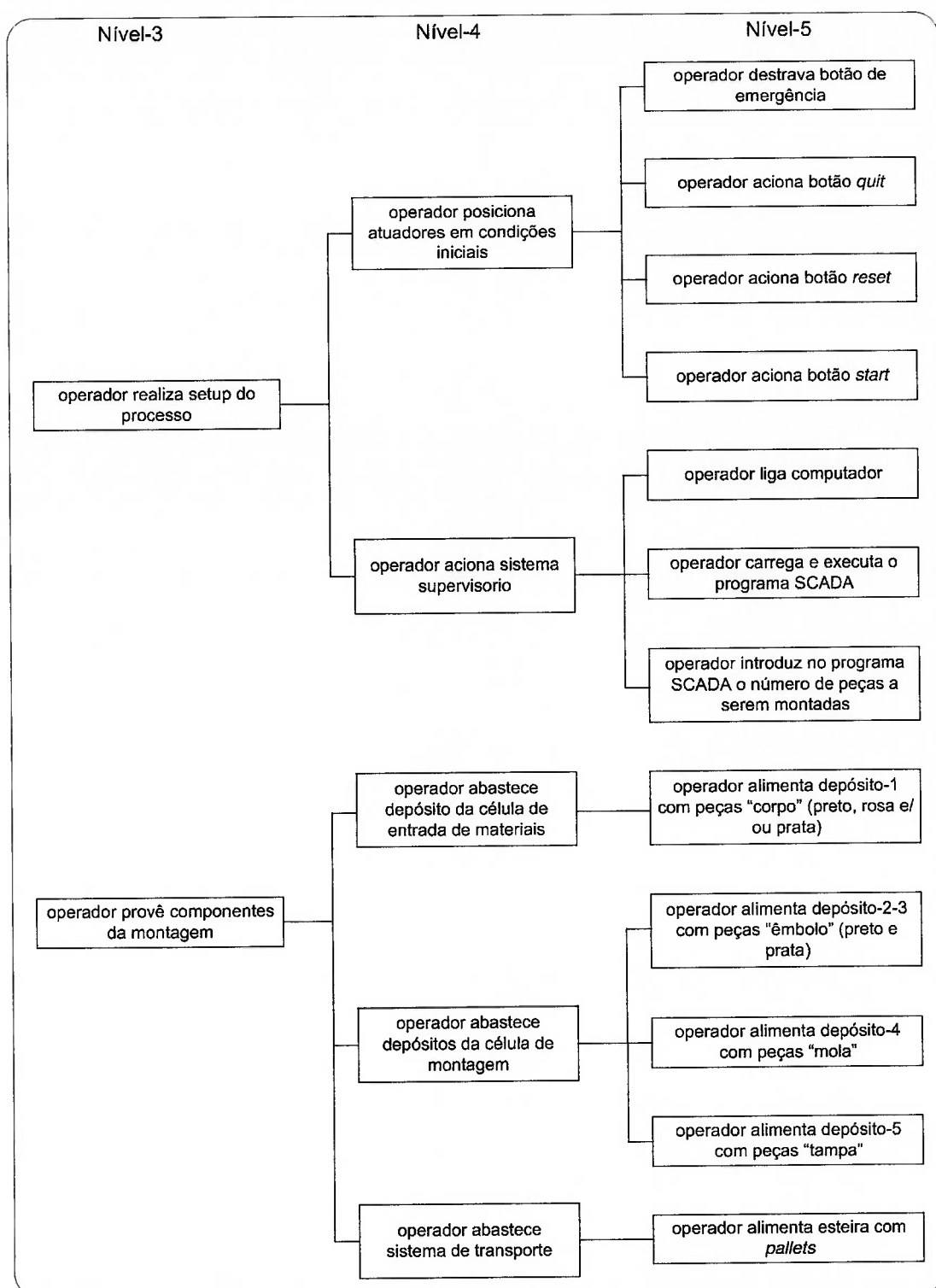


Figura B.3. Diagrama das funções do início do processo.

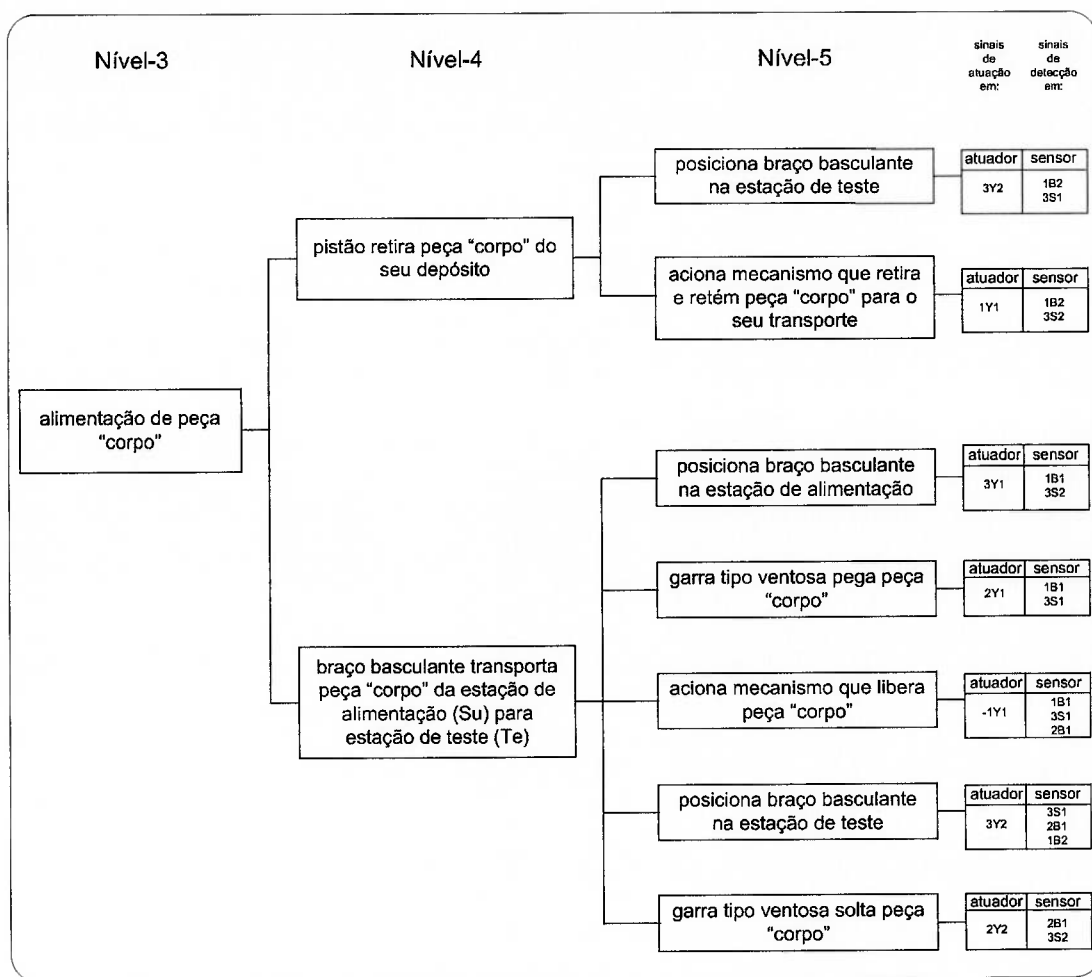


Figura B.4. Diagrama das funções da estação de alimentação (Su).

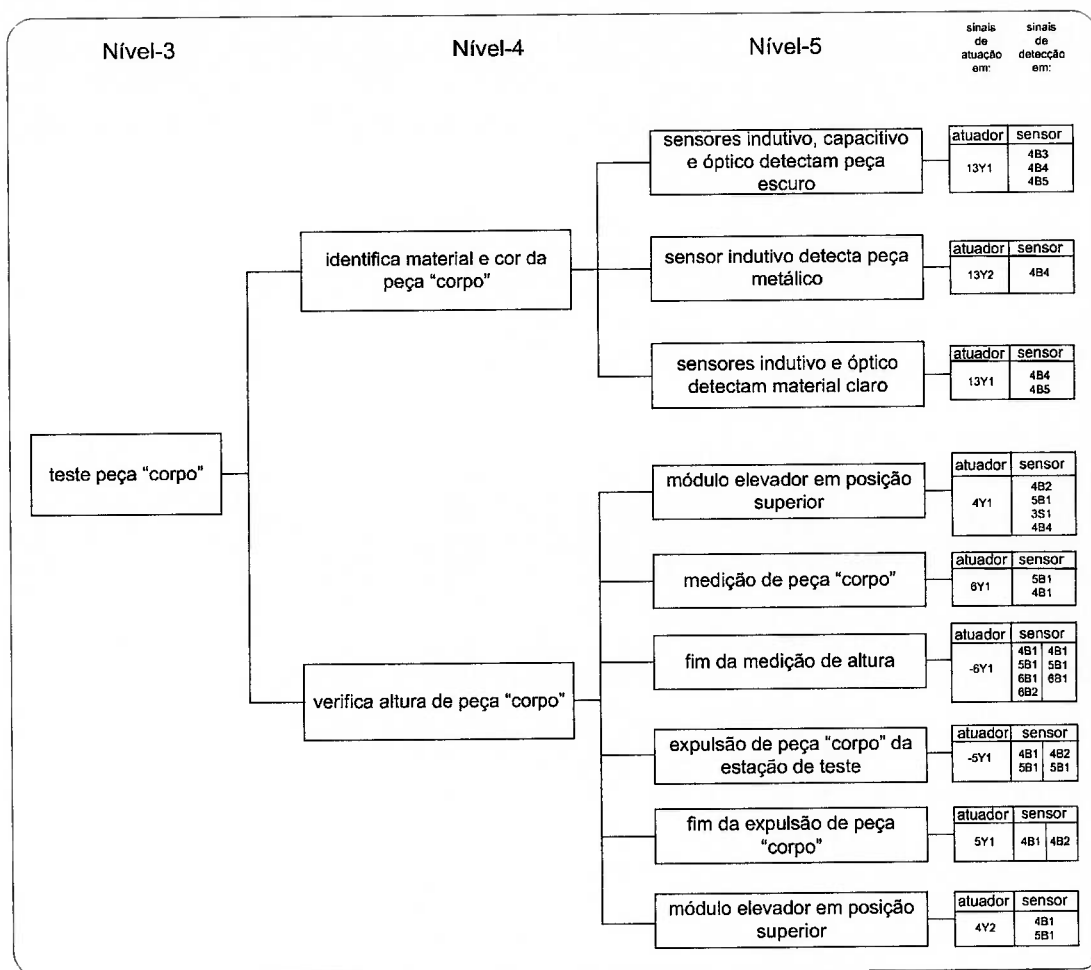


Figura B.5. Diagrama das funções da estação de teste (Te).

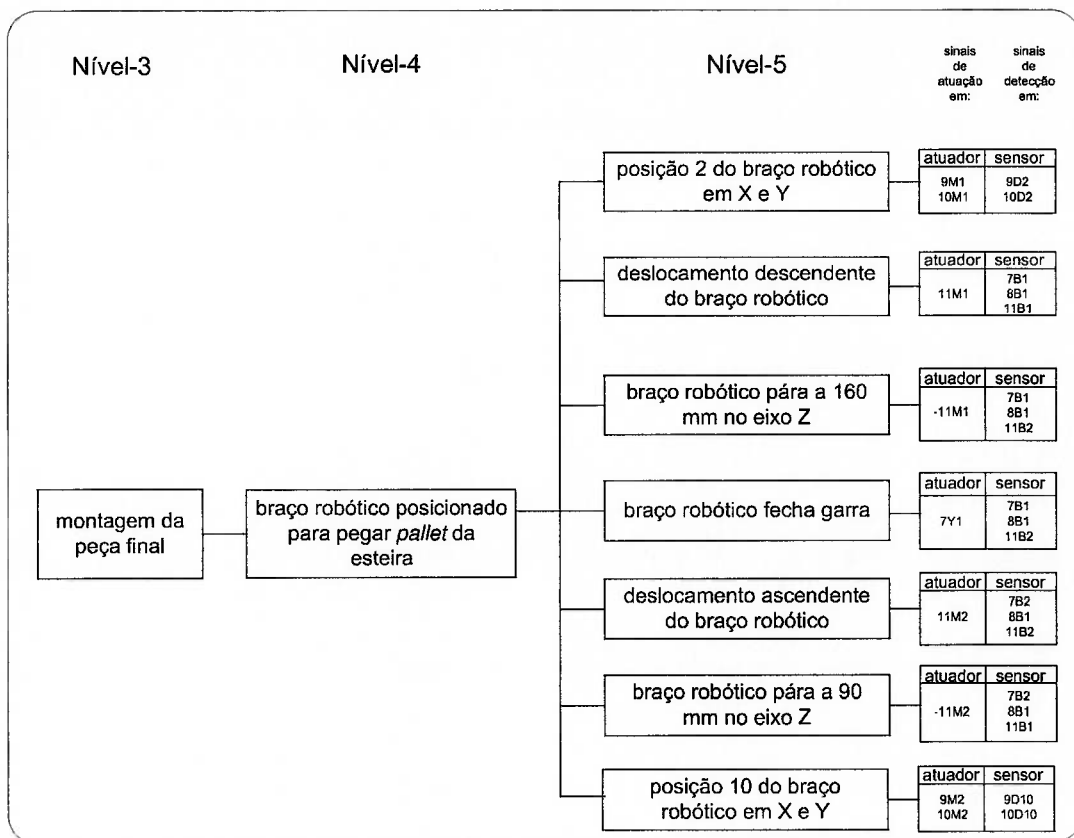


Figura B.6. Diagrama das funções do braço robótico pegando *pallet* da esteira.

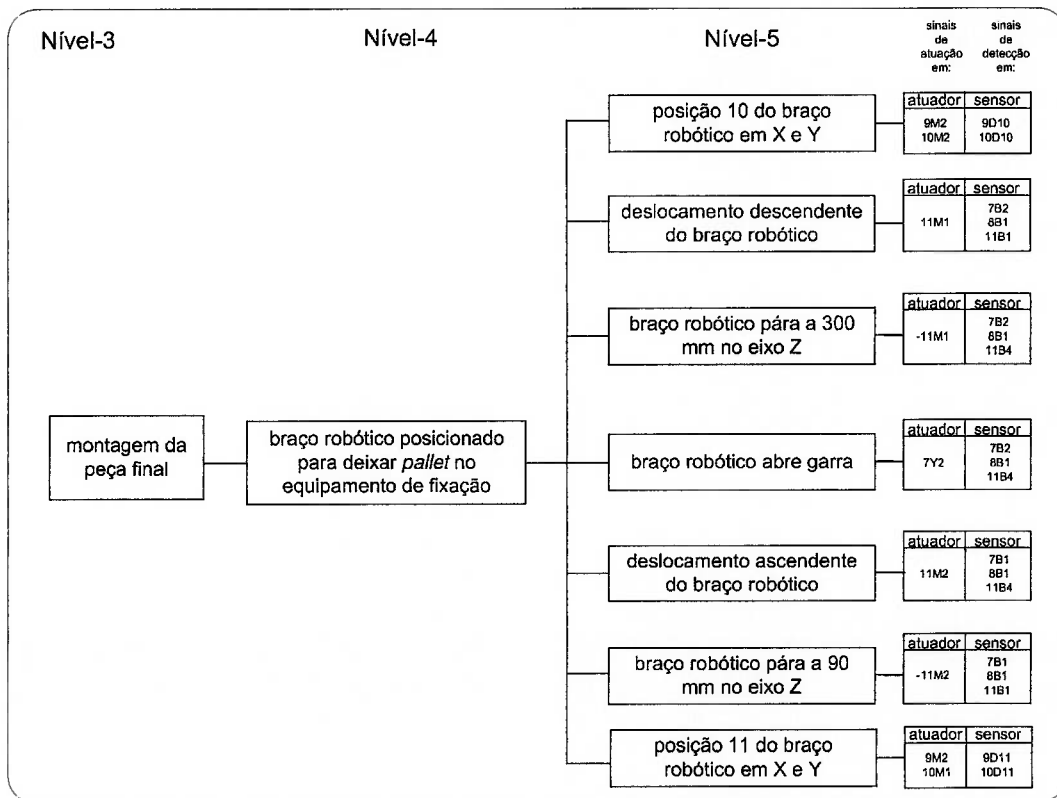


Figura B.7. Diagrama das funções do braço robótico transportando *pallet*.

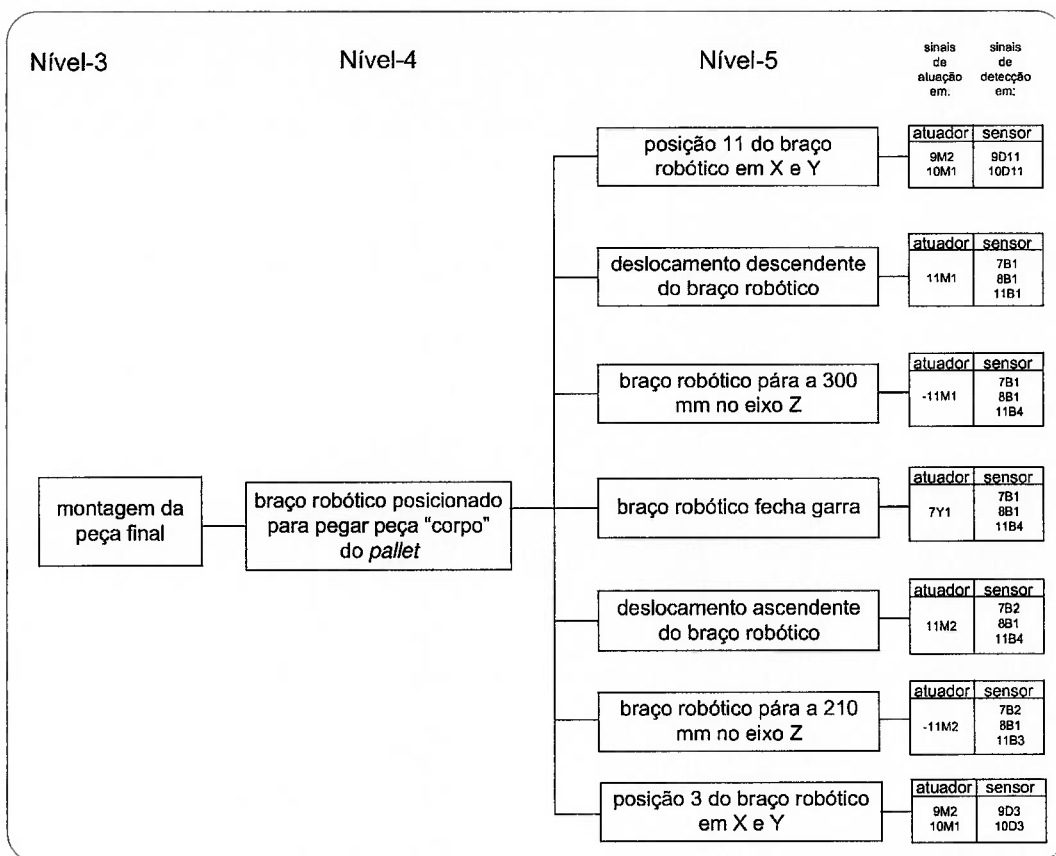


Figura B.8. Diagrama das funções do braço robótico pegando peça "corpo".

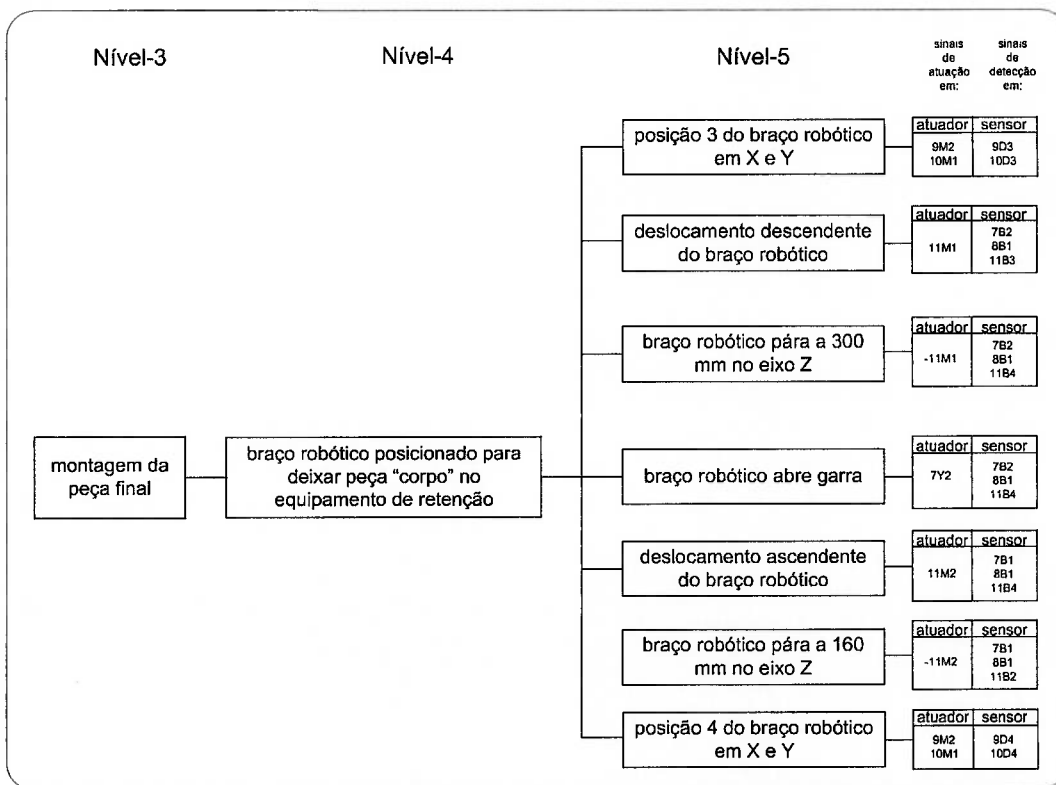


Figura B.9. Diagrama das funções do braço robótico transporta peça "corpo".

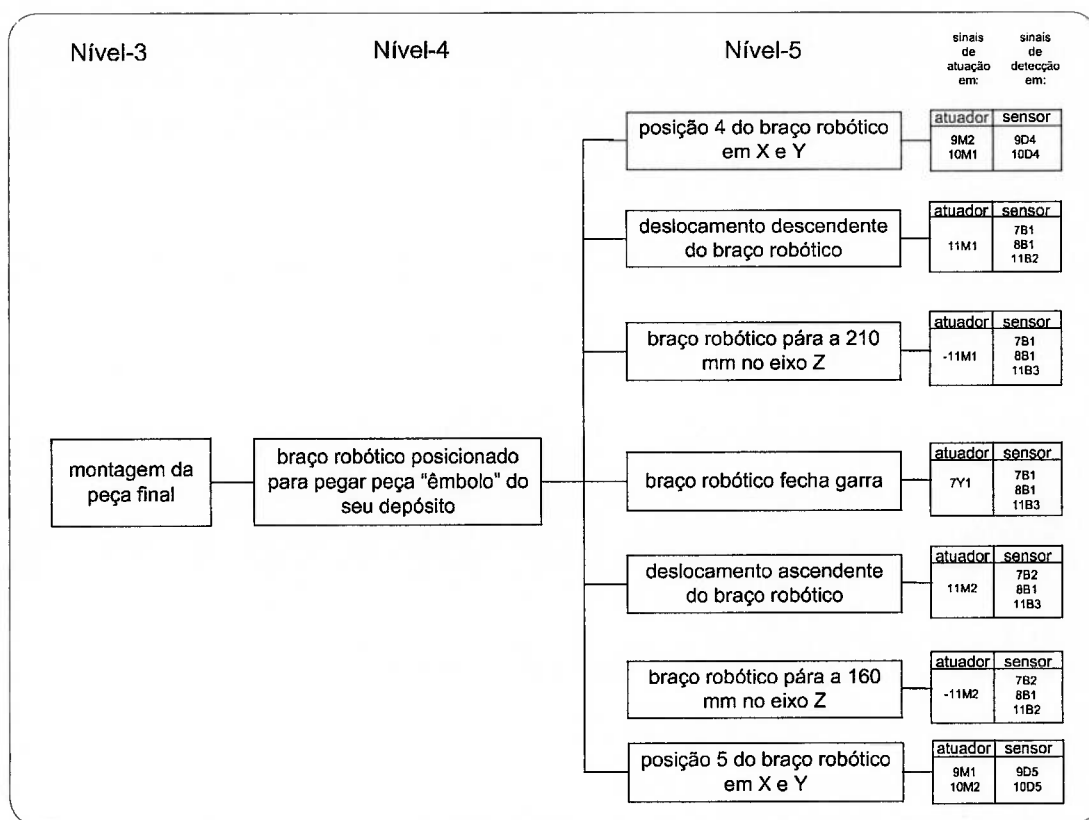


Figura B.10. Diagrama das funções do braço robótico pegando "êmbolo".

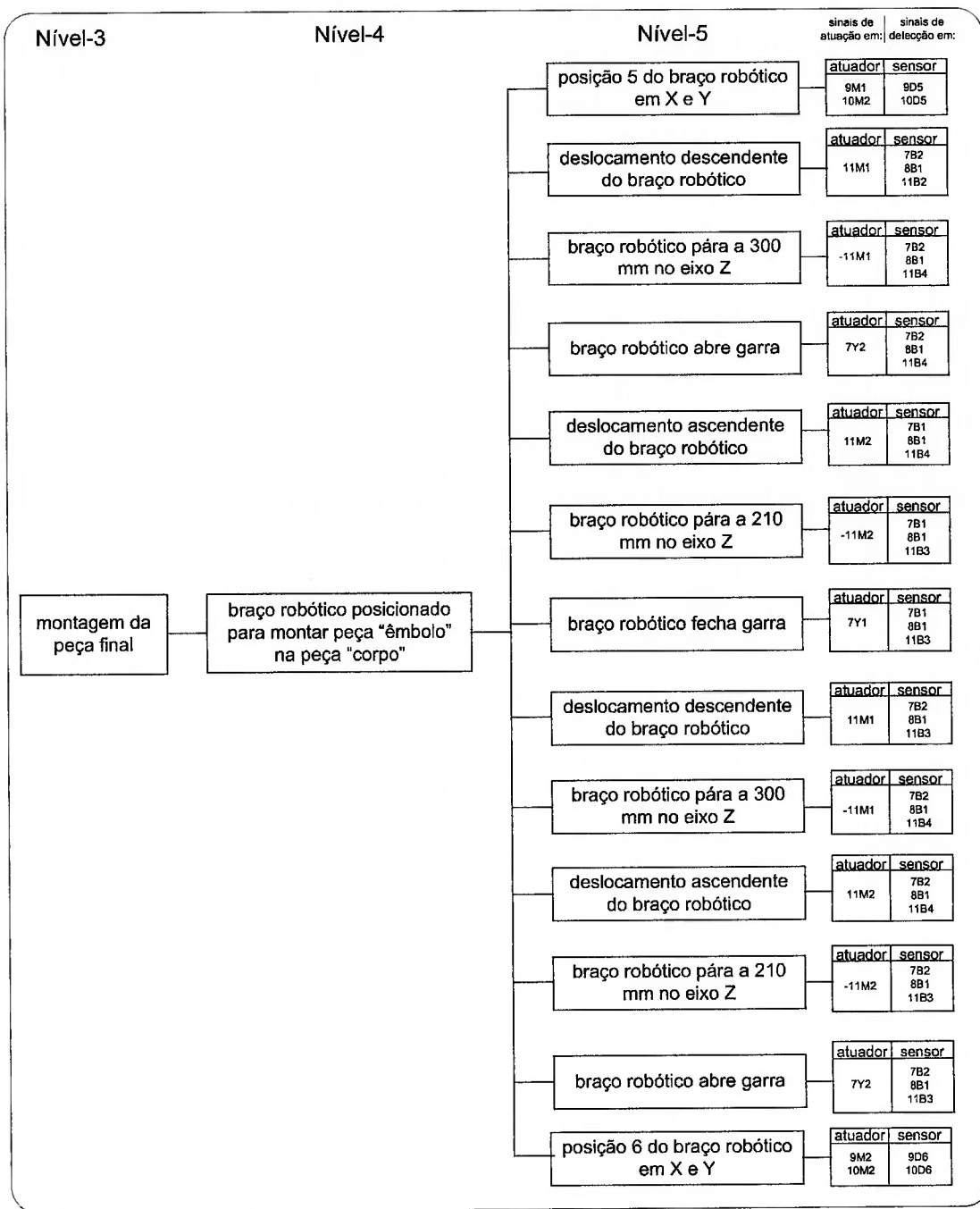


Figura B.11. Diagrama das funções do braço robótico montando "êmbolo".

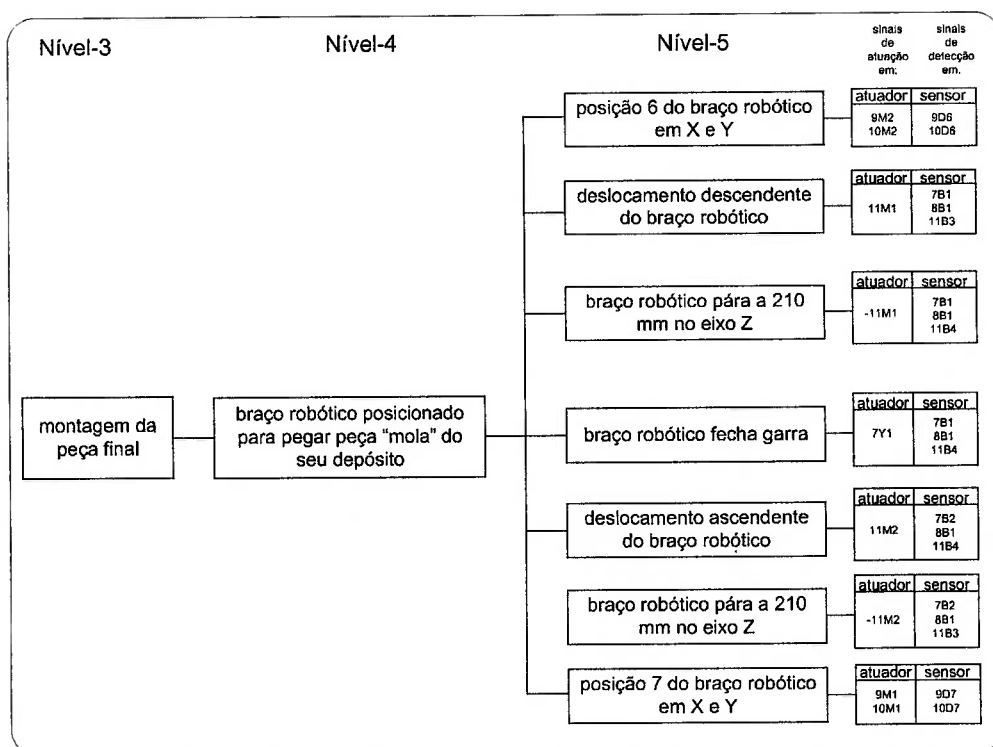


Figura B.12. Diagrama das funções do braço robótico pegando "mola".

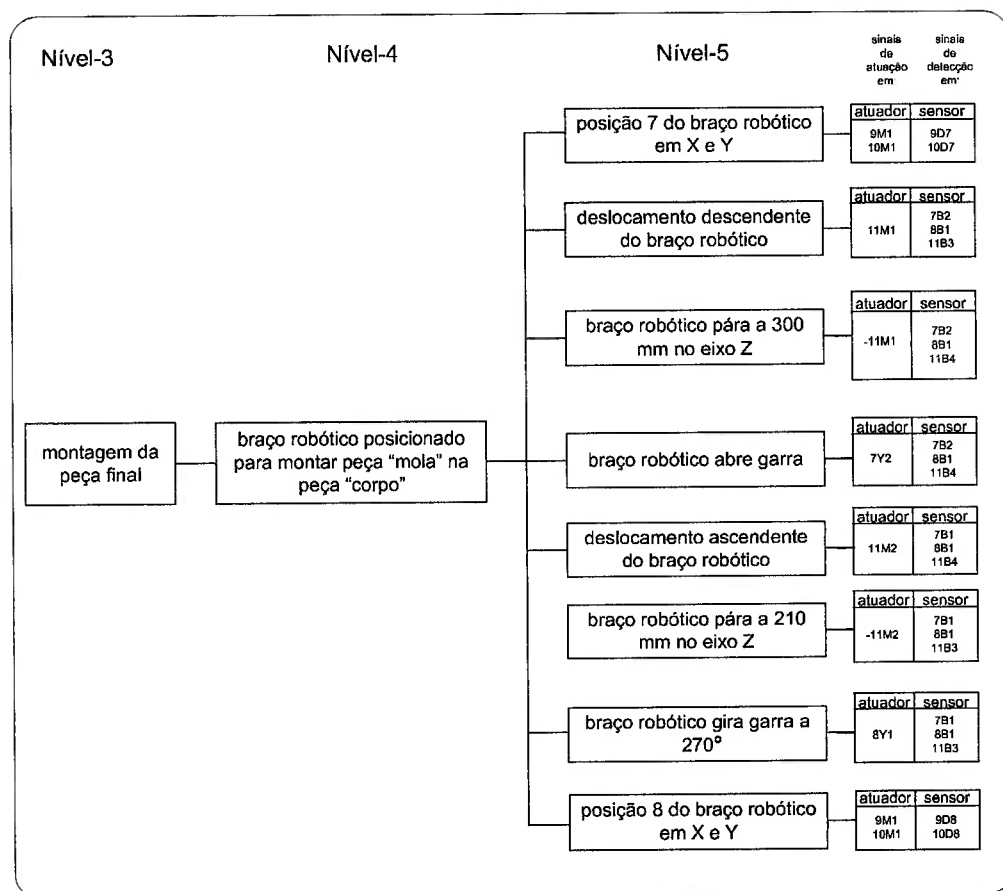


Figura B.13. Diagrama das funções do braço robótico montando "mola".

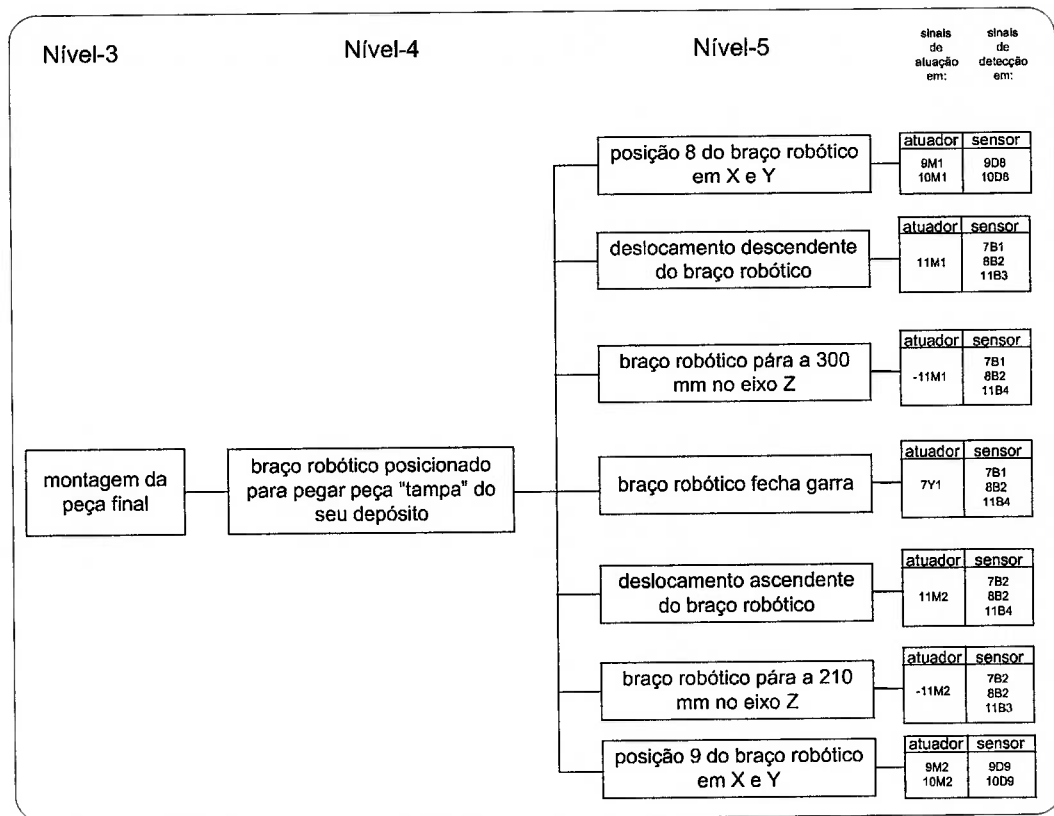


Figura B.14. Diagrama das funções do braço robótico pegando "tampa".

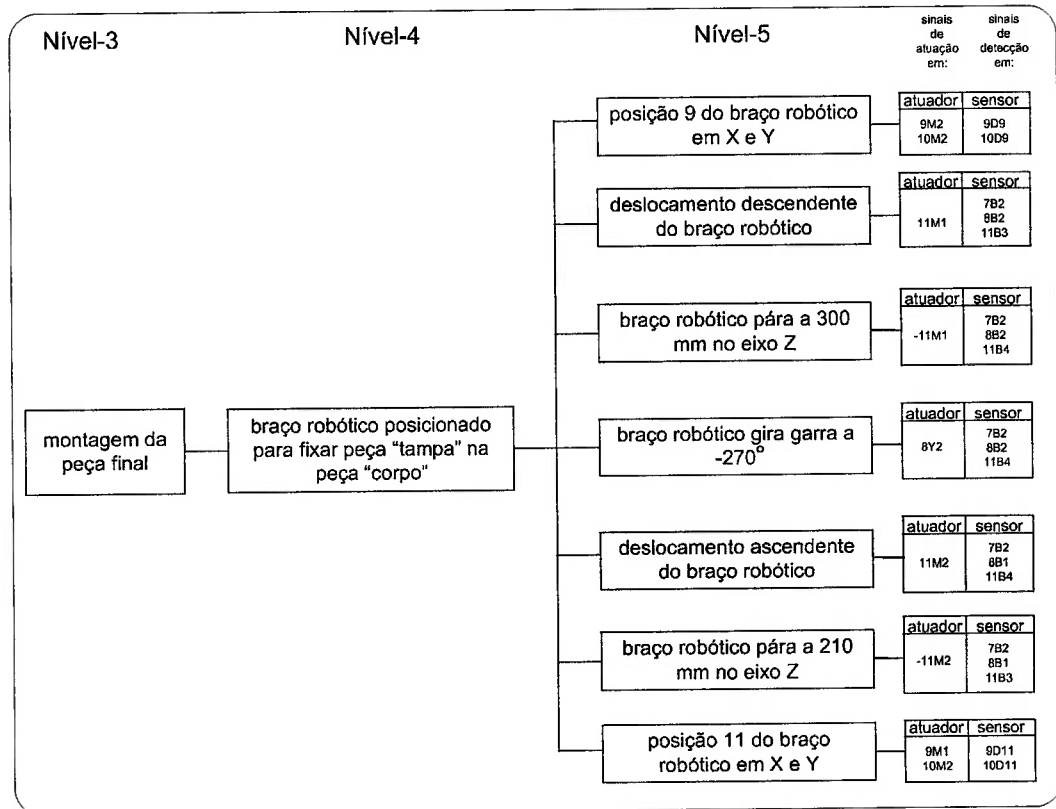


Figura B.15. Diagrama das funções do braço robótico fixando "tampa".

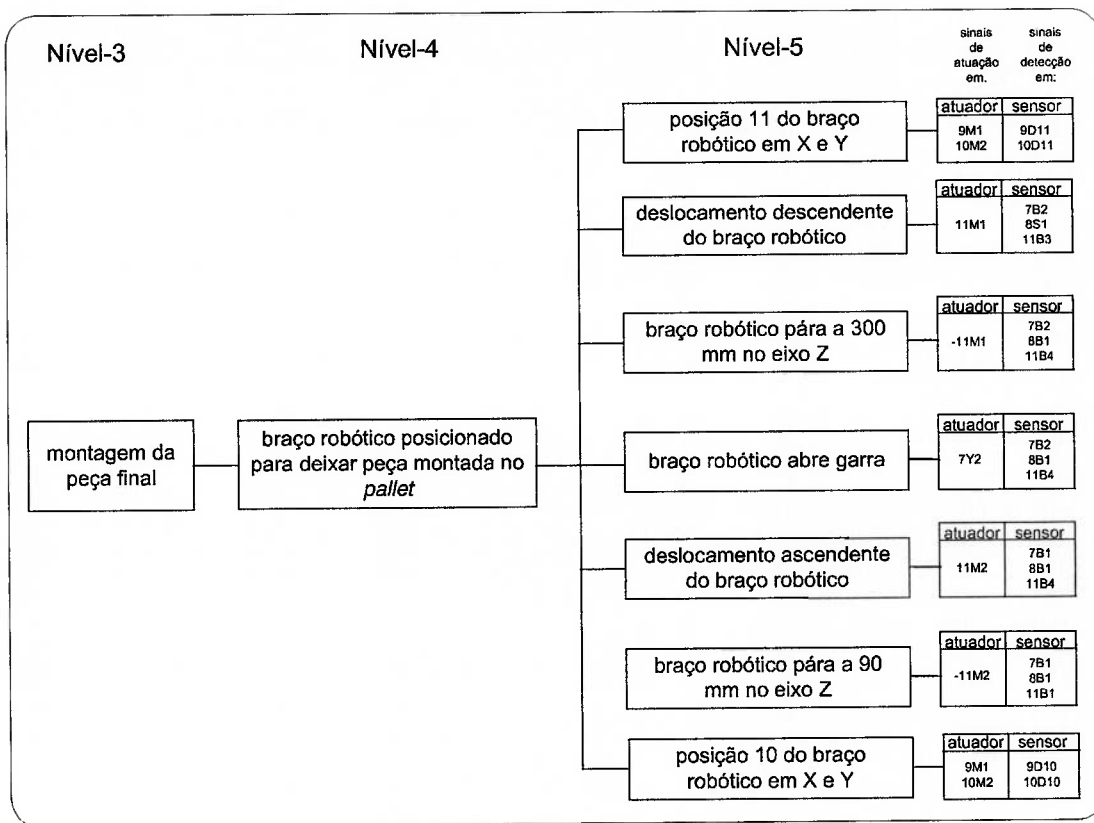


Figura B.16. Diagrama das funções do braço robótico transporta peça montada.

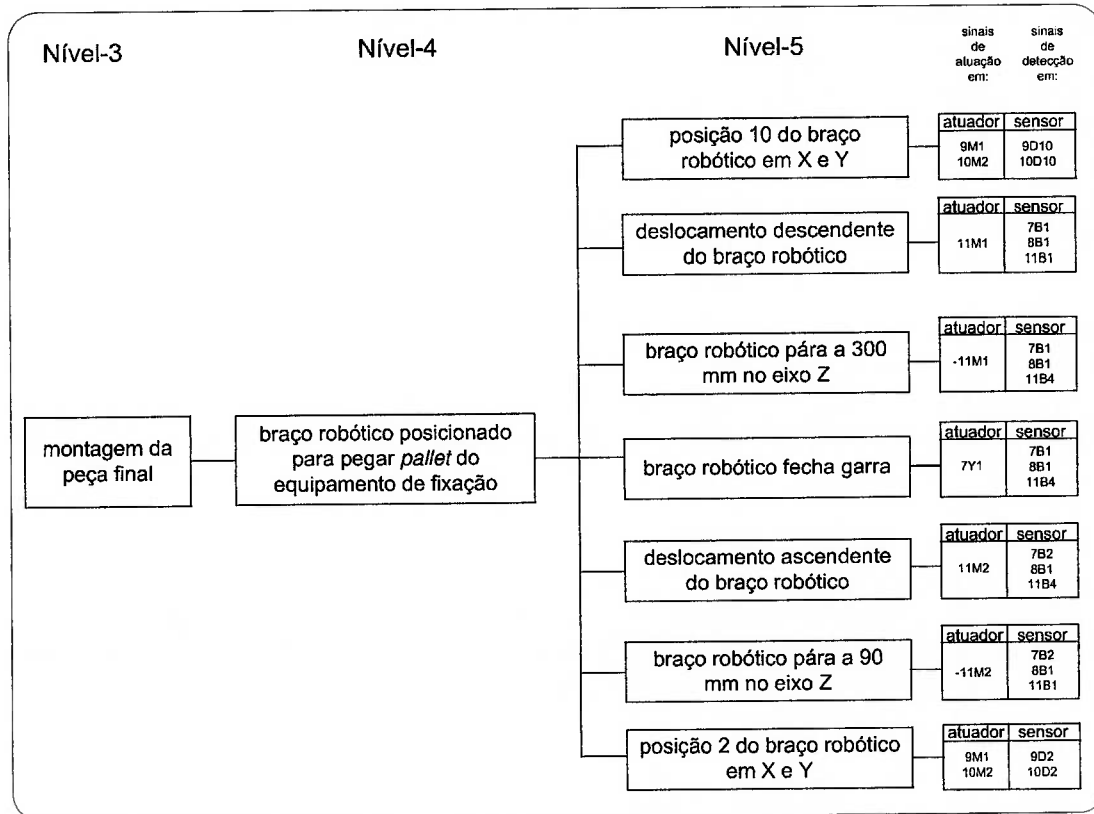


Figura B.17. Diagrama das funções do braço robótico pegando *pallet*.

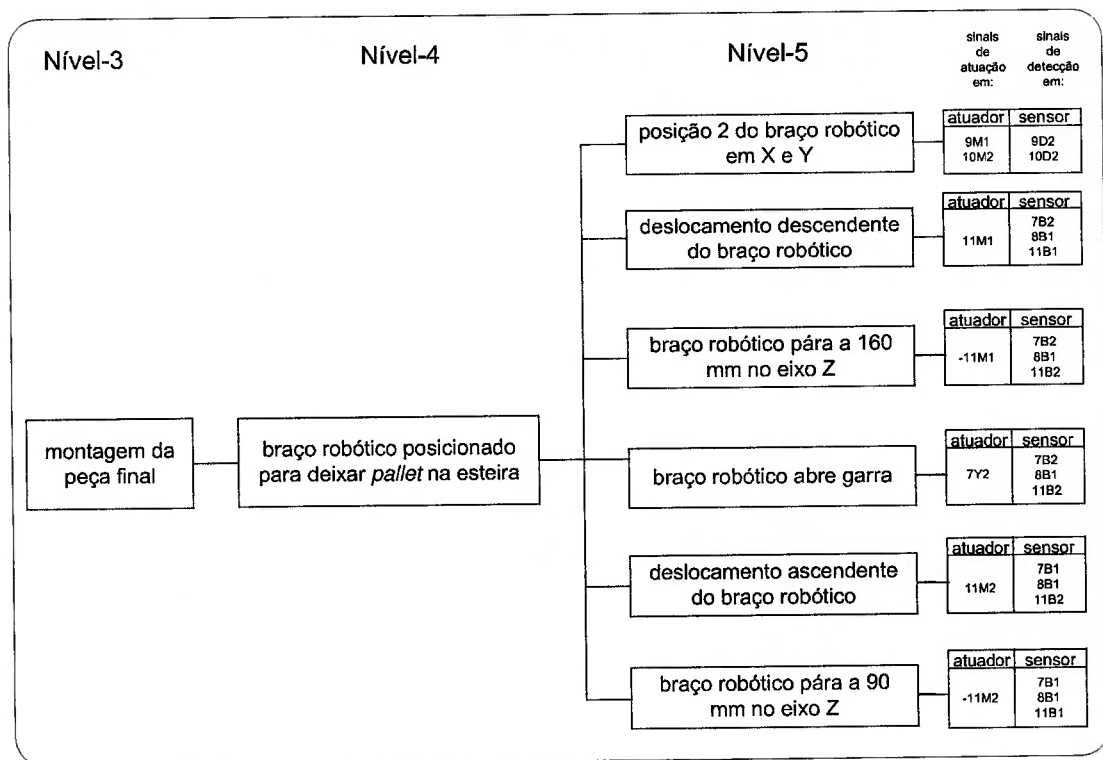


Figura B.18. Diagrama das funções do braço robótico transportando *pallet*.

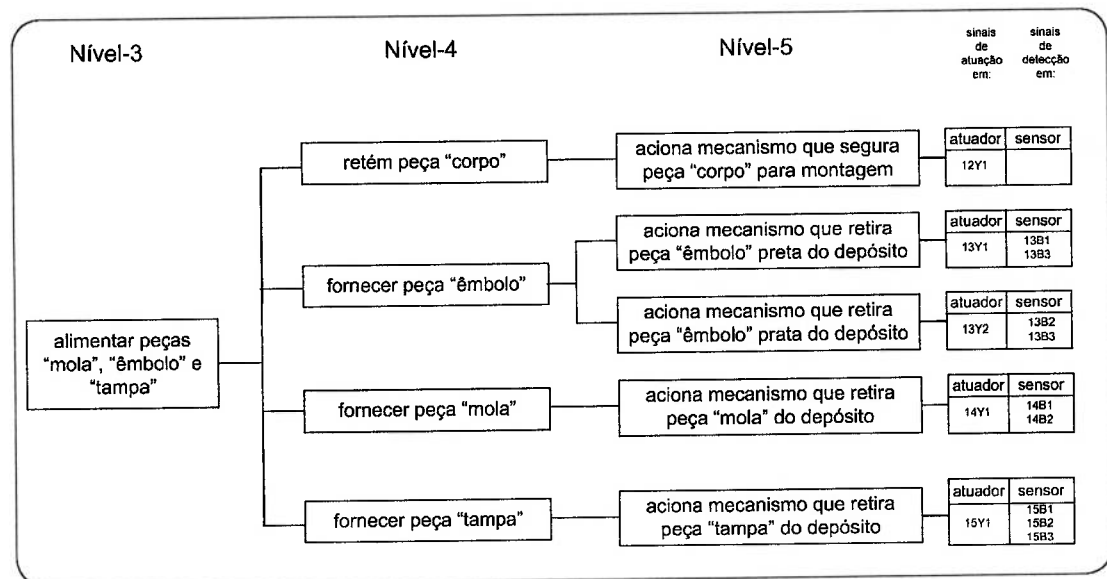


Figura B.19. Diagrama das funções da estação de montagem (As)

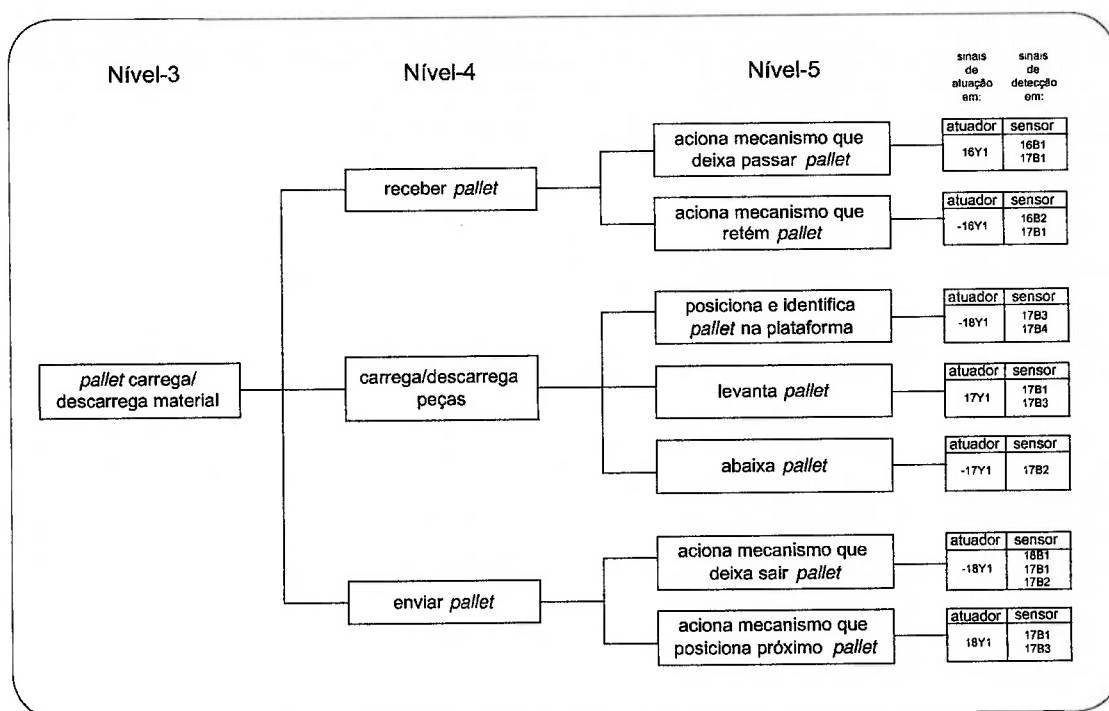


Figura B.20. Diagrama das funções do sistema de transporte (T)

B.2. Fluxo de produção do FAS em PFS

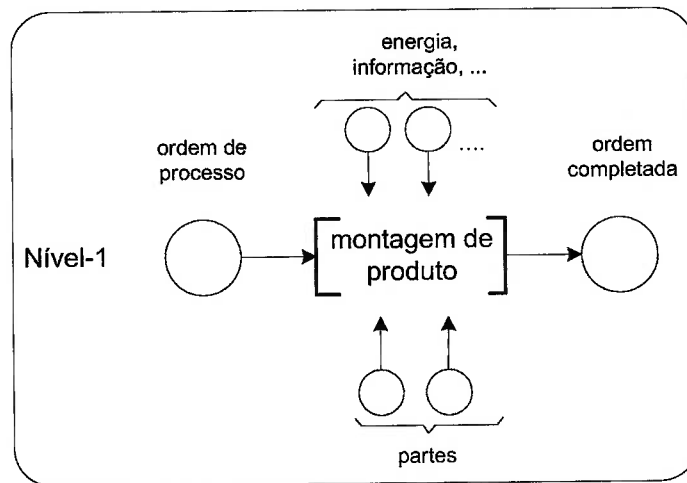


Figura B.21. PFS do FAS.

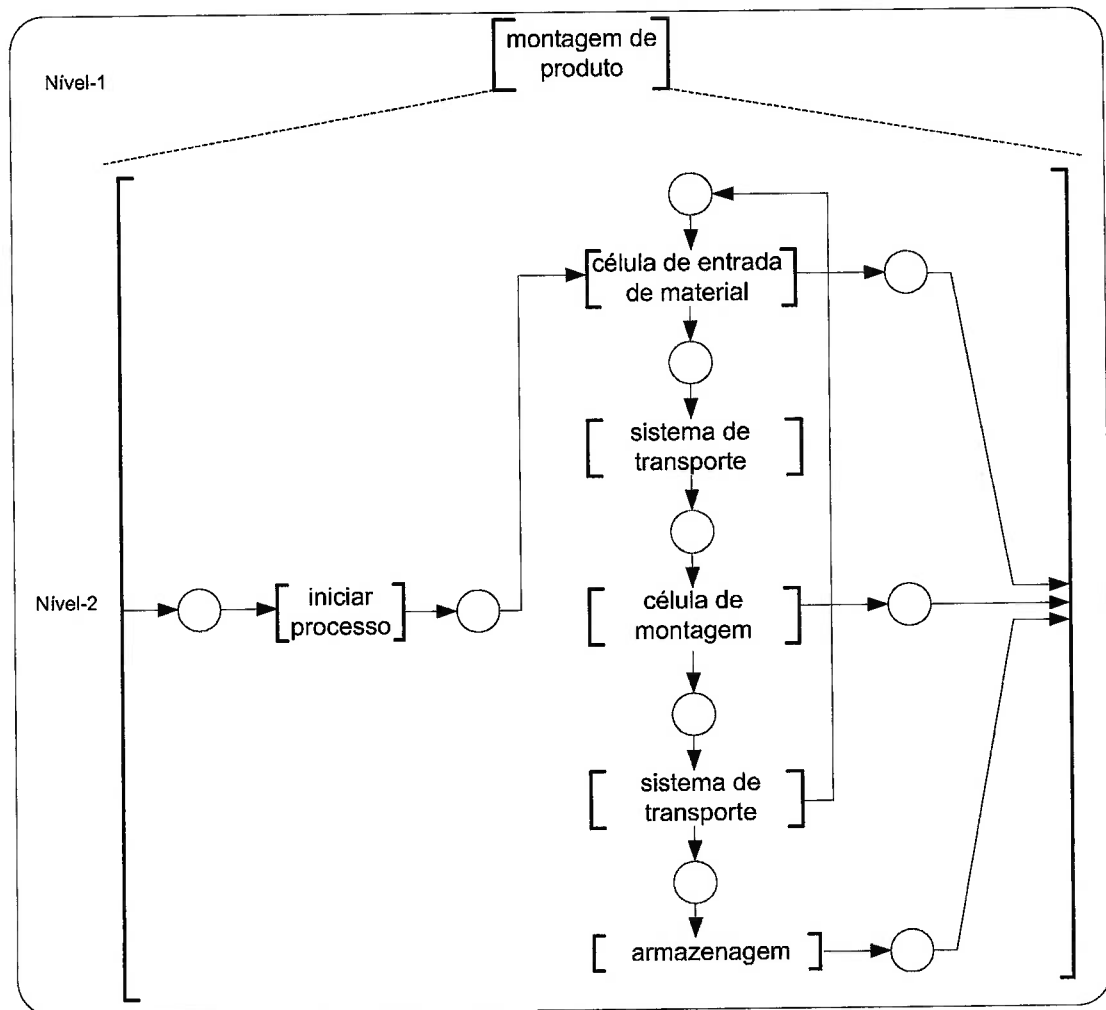


Figura B.22. PFS das células de produção do FAS.

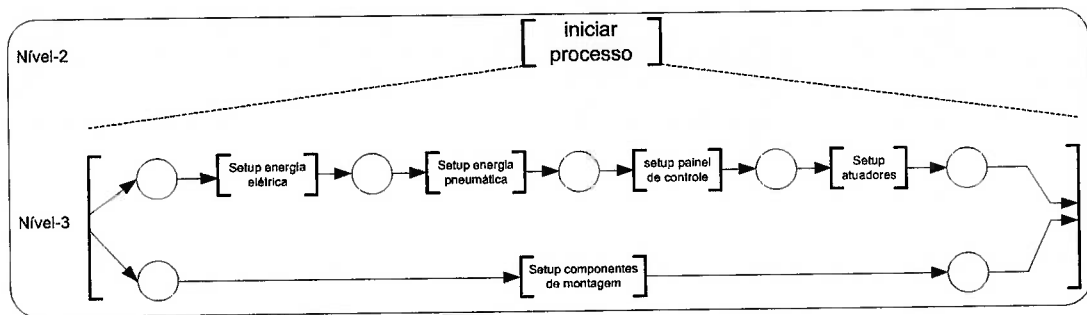


Figura B.23. Detalhamento em PFS da etapa iniciar processo

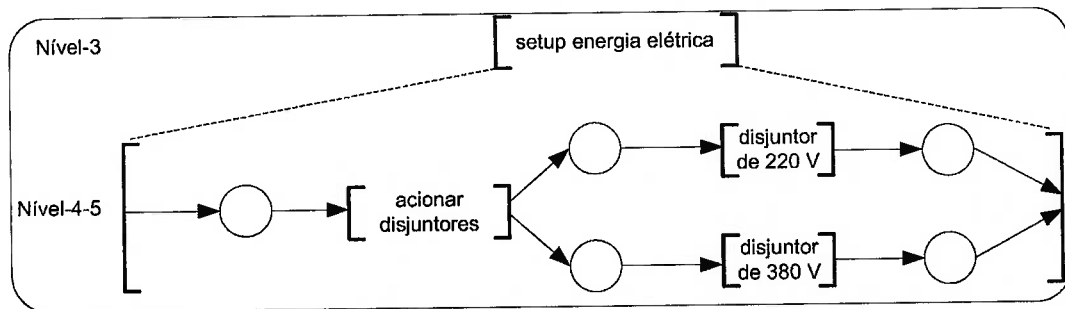


Figura B.24. Detalhamento em PFS da etapa setup da energia elétrica

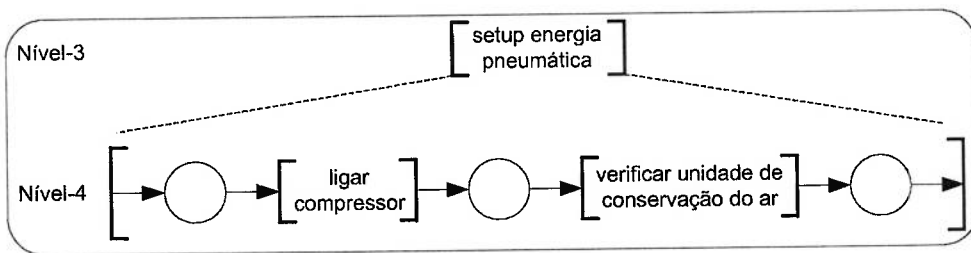


Figura B.25. Detalhamento em PFS da etapa setup energia pneumática

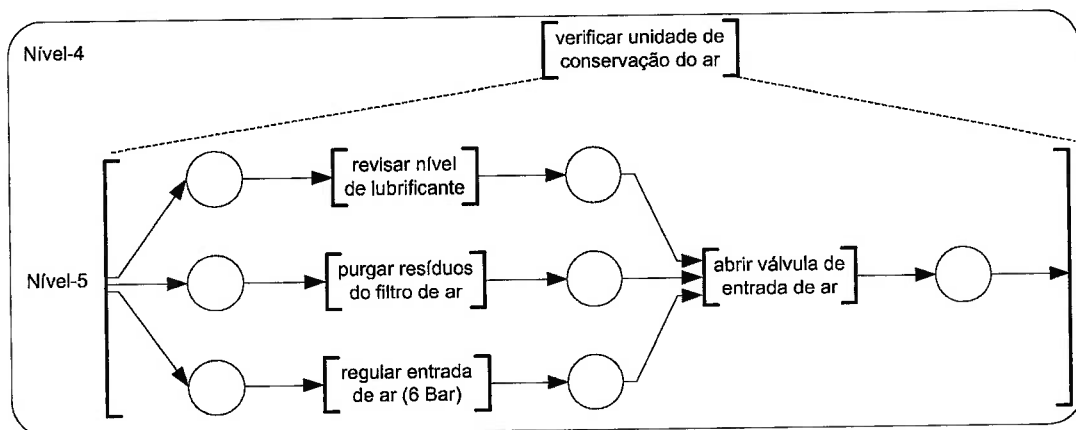


Figura B.26. Detalhamento em PFS da etapa verificar ar

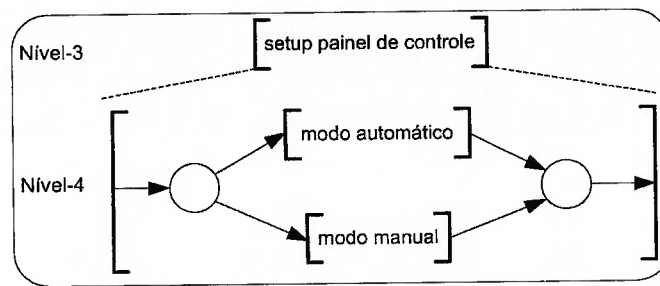


Figura B.27. Detalhamento em PFS da etapa setup painel de controle

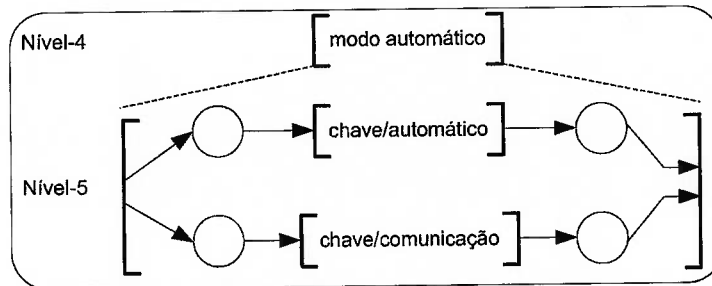


Figura B.28. Detalhamento em PFS do modo automático

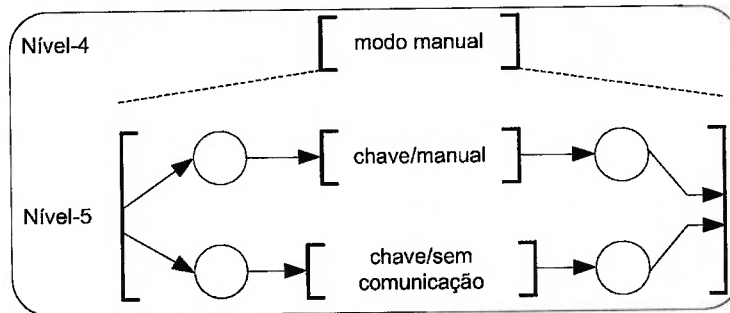


Figura B.29. Detalhamento em PFS do modo manual

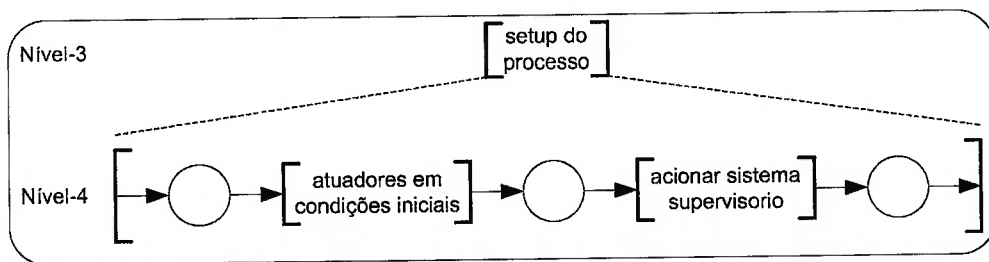


Figura B.30. Detalhamento em PFS da etapa setup processo

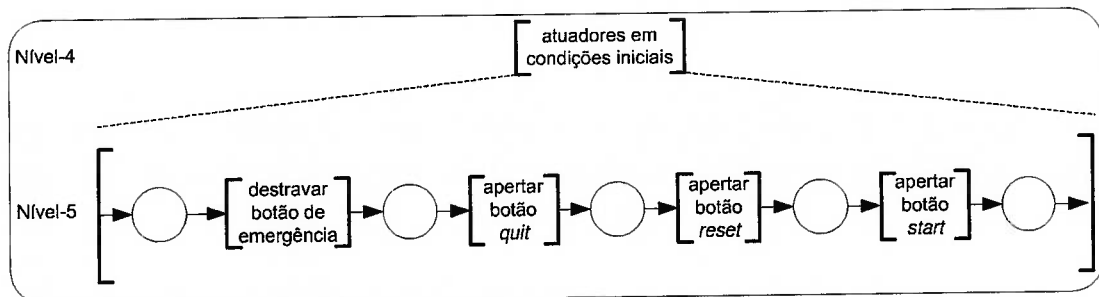


Figura B.31. Detalhamento em PFS das condições iniciais dos atuadores

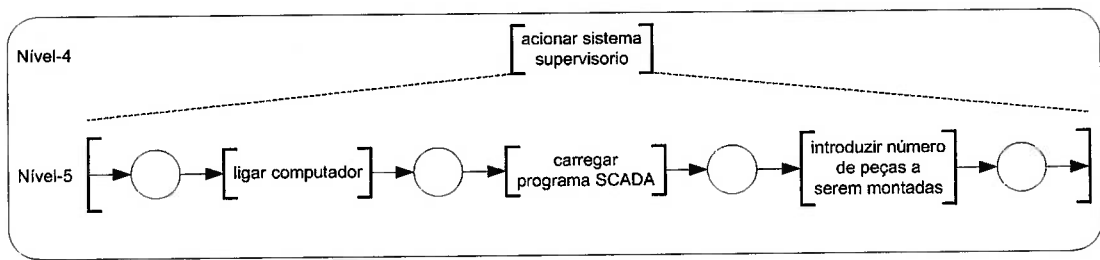


Figura B.32. Detalhamento em PFS do sistema supervisorio

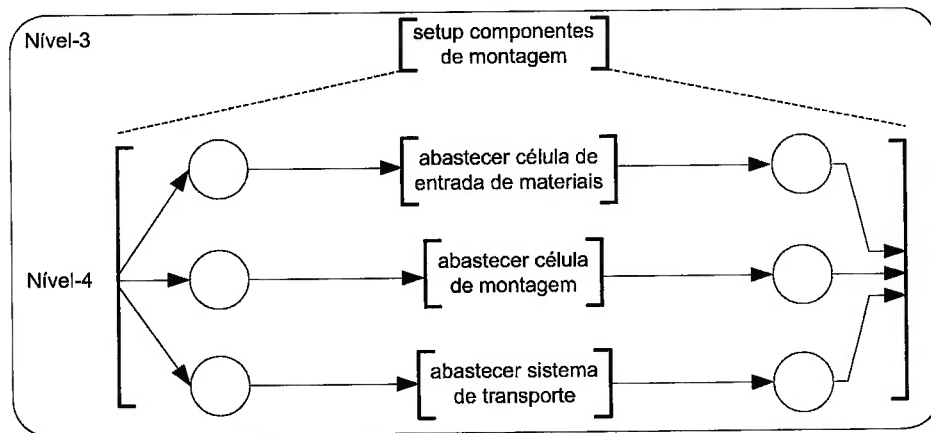


Figura B.33. Detalhamento em PFS dos depósitos

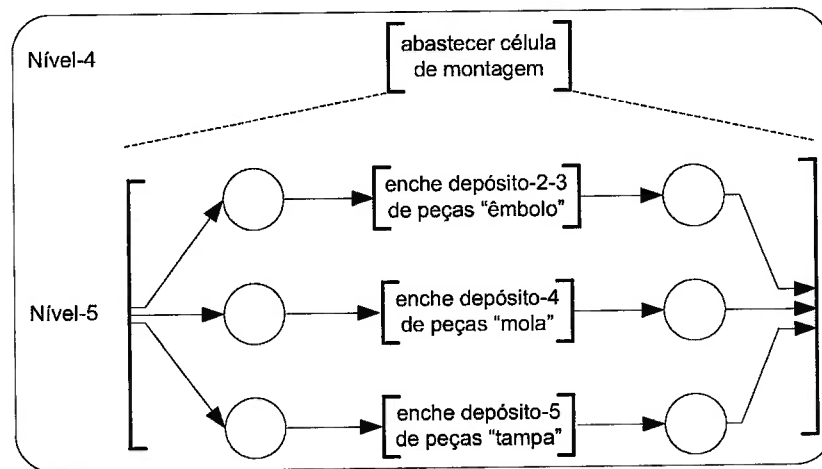


Figura B.34. Detalhamento em PFS dos depósitos da estação (As)

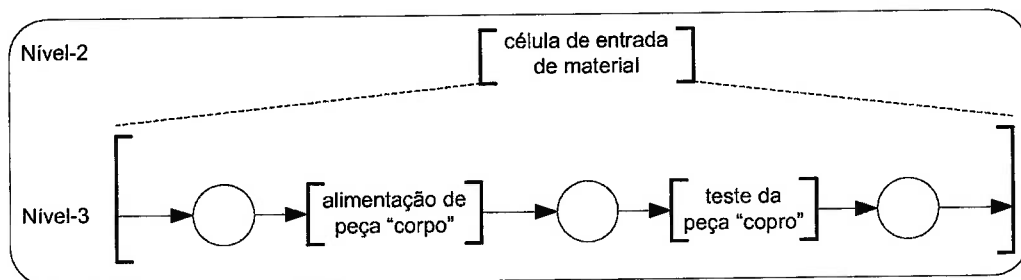


Figura B.35. Detalhamento em PFS da célula (I).

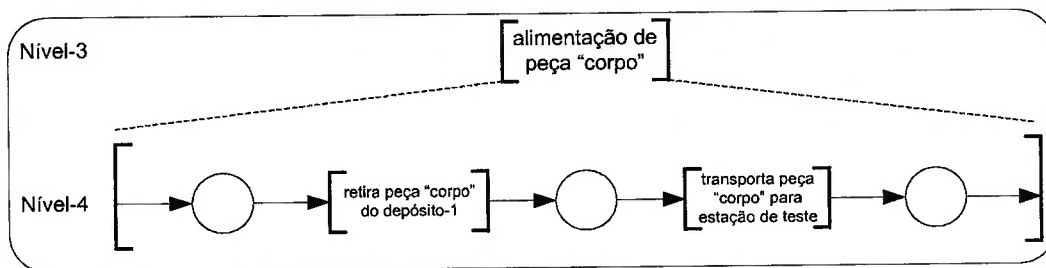


Figura B.36. Detalhamento em PFS da estação (Su)

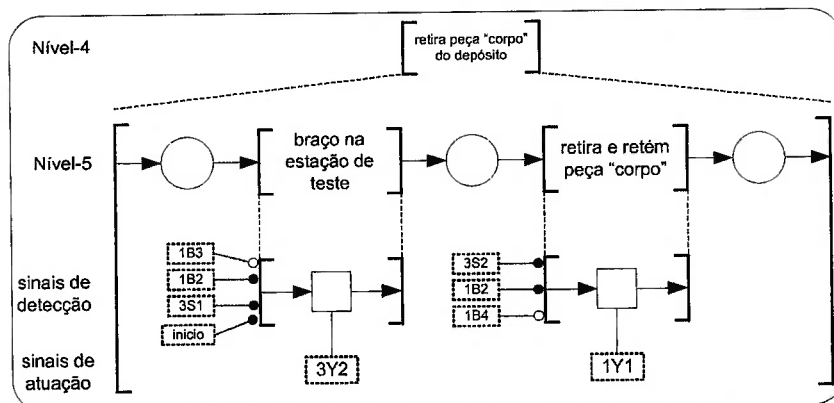


Figura B.37. Detalhamento em PFS da estação (Su)

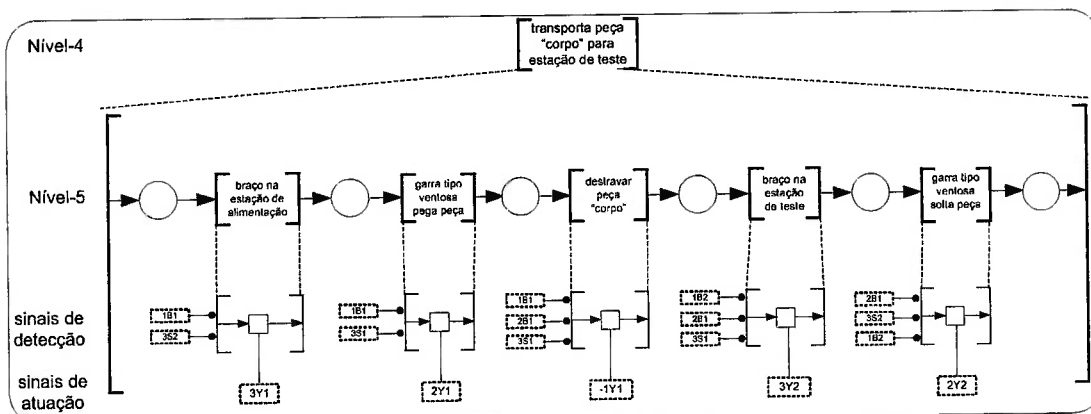


Figura B.38. Detalhamento em PFS da estação (Su)

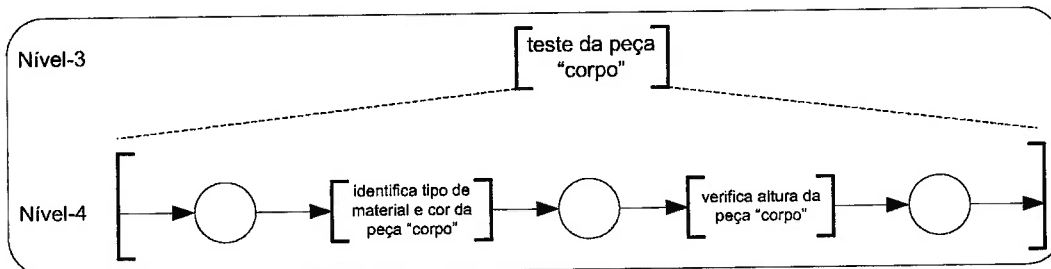


Figura B.39. Detalhamento em PFS da estação (Te).

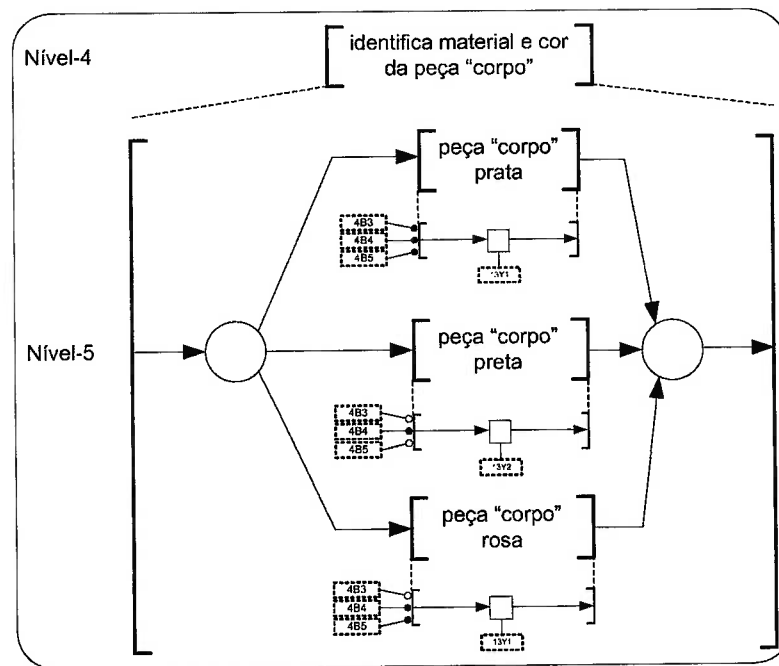


Figura B.40. Detalhamento em PFS da estação (Te)

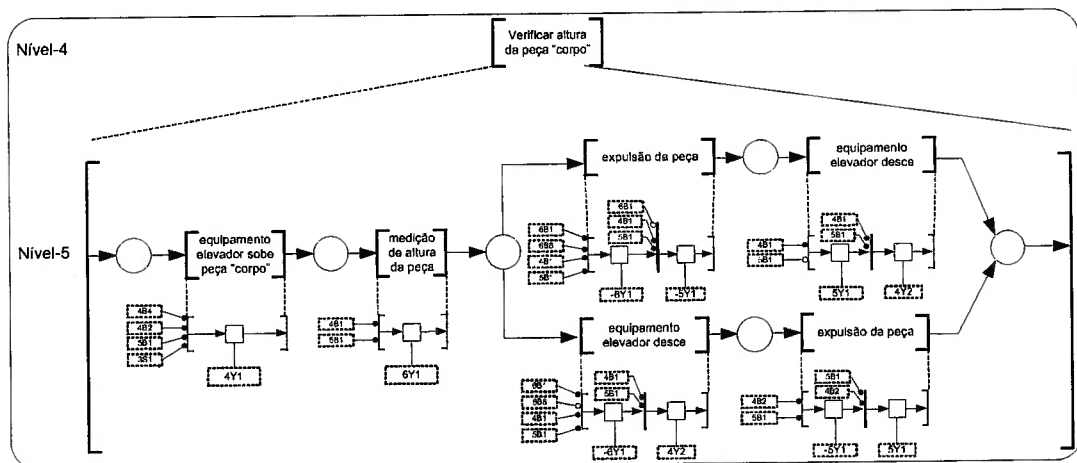


Figura B.41. Detalhamento em PFS da estação (Te)

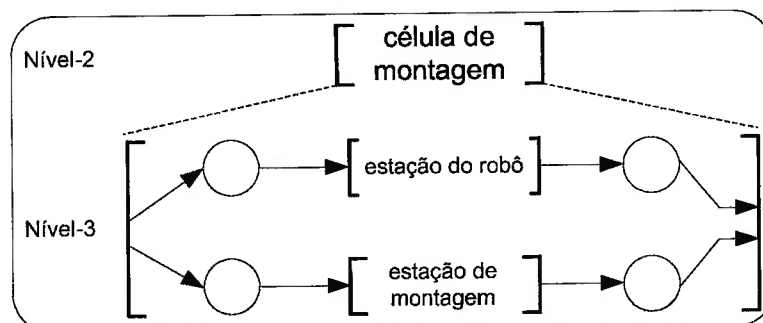


Figura B.42. Detalhamento em PFS da célula (A)

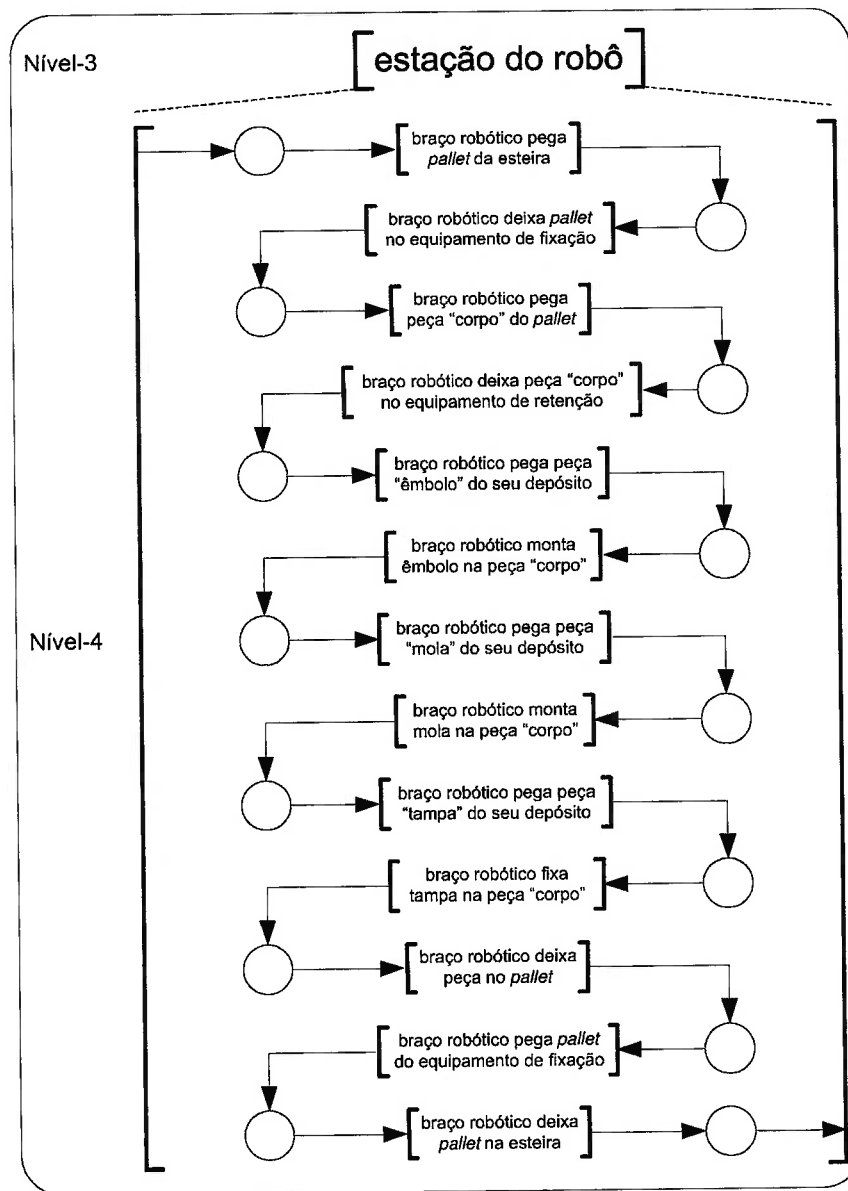


Figura B.43. Detalhamento em PFS da estação (Ro).

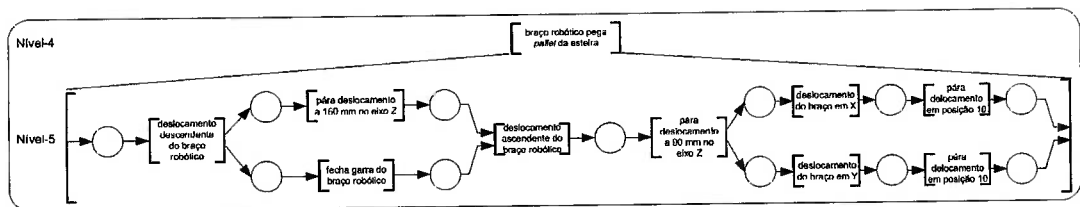


Figura B.44. Detalhamento em PFS do robô pegando *pallet*

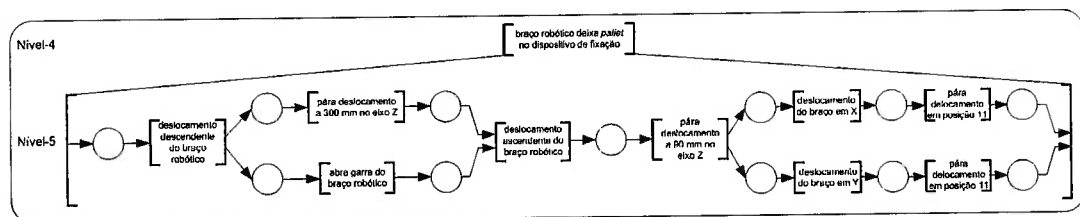


Figura B.45. Detalhamento em PFS do robô transportando *pallet*

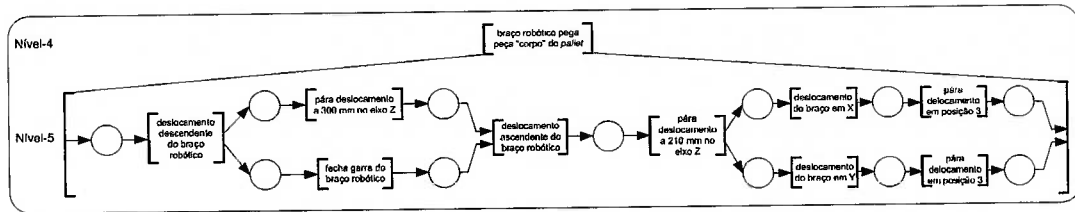


Figura B.46. Detalhamento em PFS do robô pegando peça “corpo”.

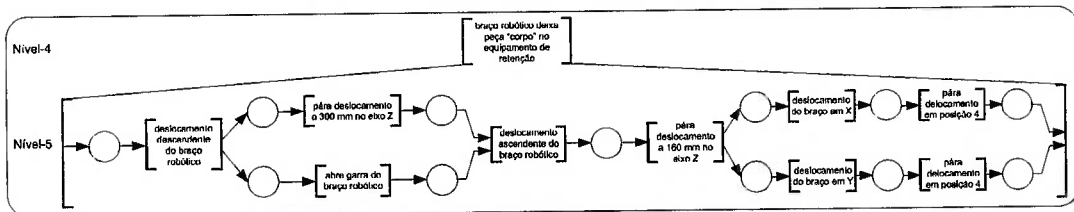


Figura B.47. Detalhamento em PFS do robô transportando peça “corpo”.

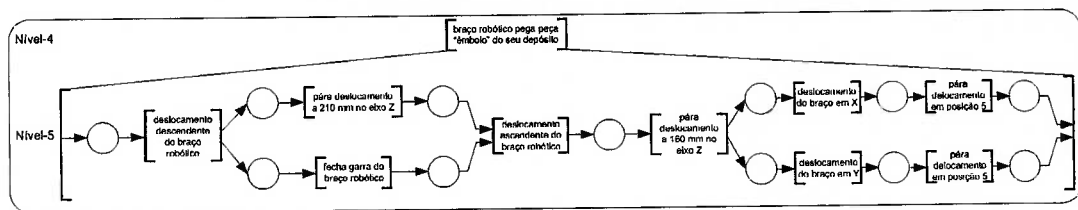


Figura B.48. Detalhamento em PFS do robô pegando “êmbolo”.

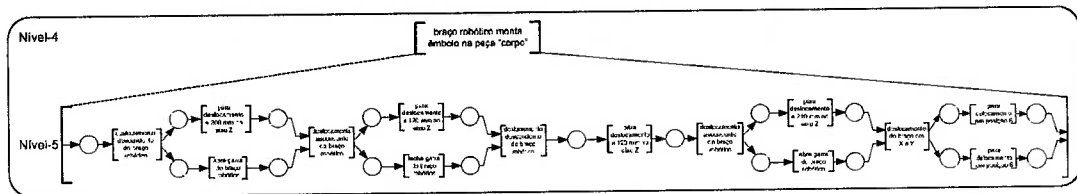


Figura B.49. Detalhamento em PFS do robô montando “êmbolo”.

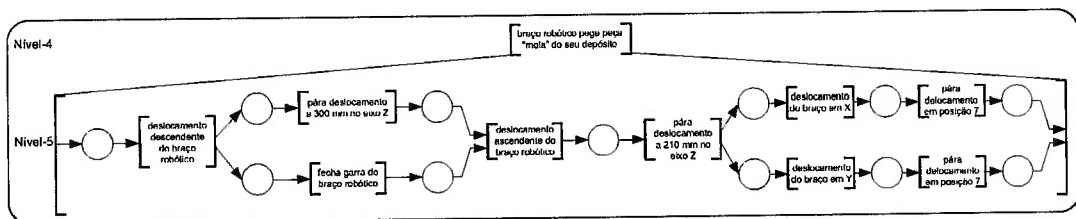


Figura B.50. Detalhamento em PFS do robô pegando “mola”.

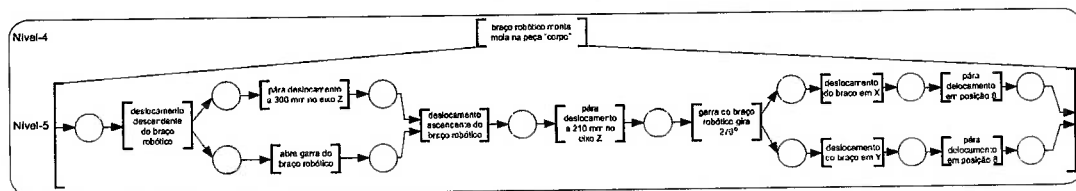


Figura B.51. Detalhamento em PFS do robô montando “mola”.

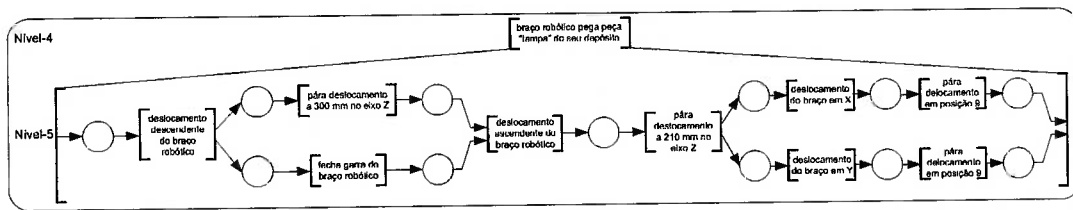


Figura B.52. Detalhamento em PFS do robô pegando "tampa".

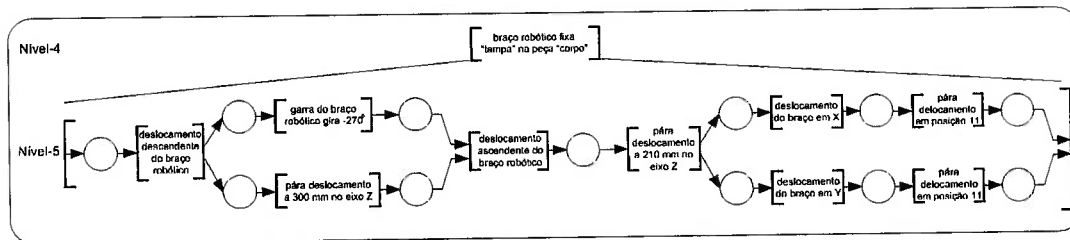


Figura B.53. Detalhamento em PFS do robô fixando "tampa".

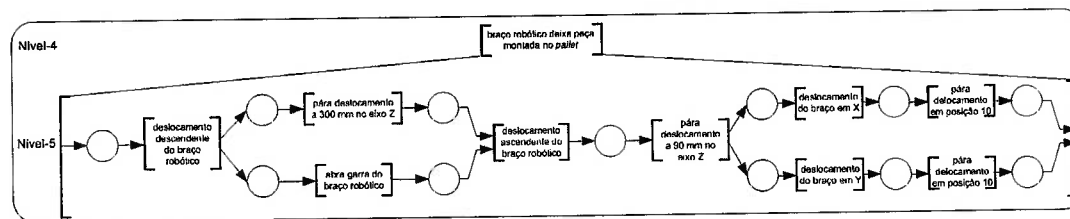


Figura B.54. Detalhamento em PFS do robô transportando peça montada.

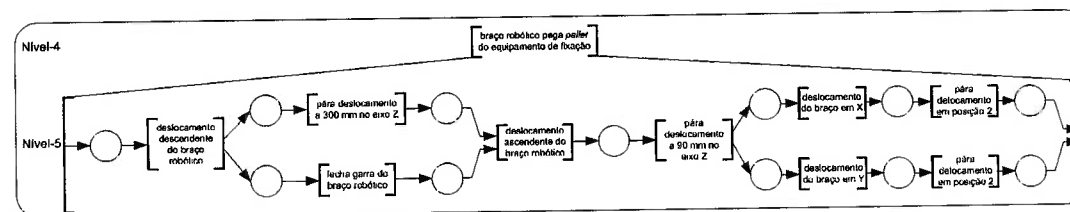


Figura B.55. Detalhamento em PFS do robô pega pallet.

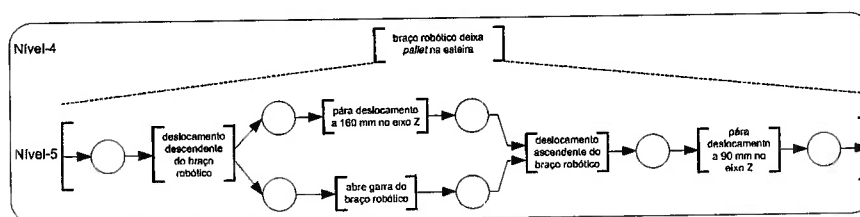


Figura B.56. Detalhamento em PFS do robô transportando pallet.

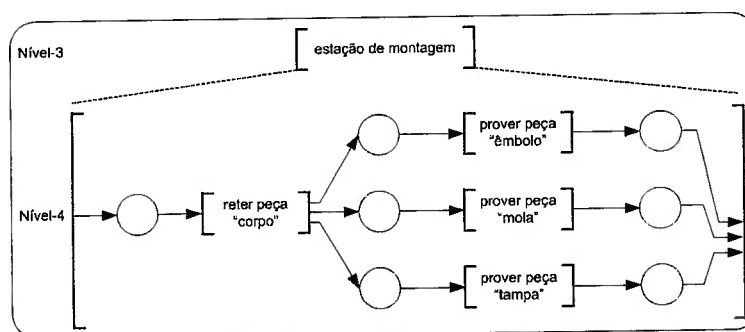


Figura B.57. Detalhamento em PFS da estação (As).

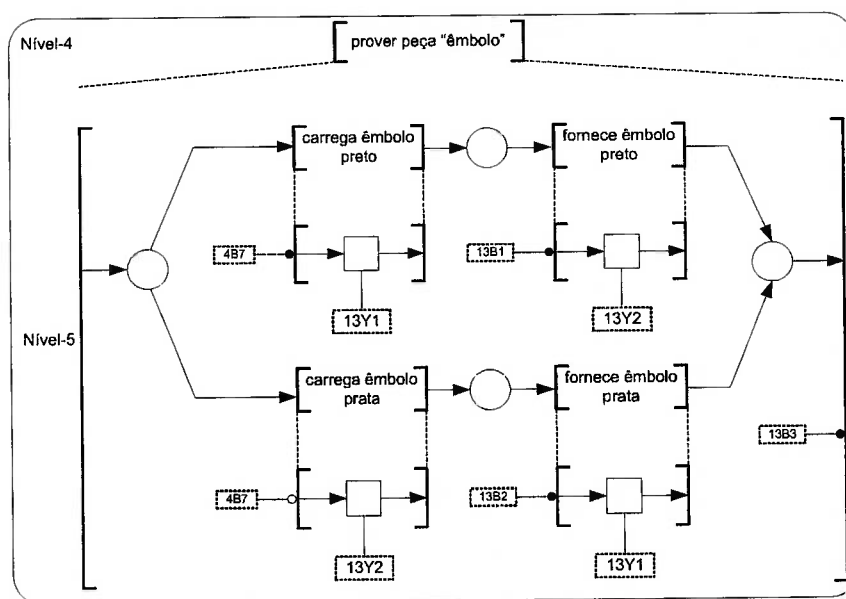


Figura B.58. Detalhamento em PFS do depósito de êmbolos

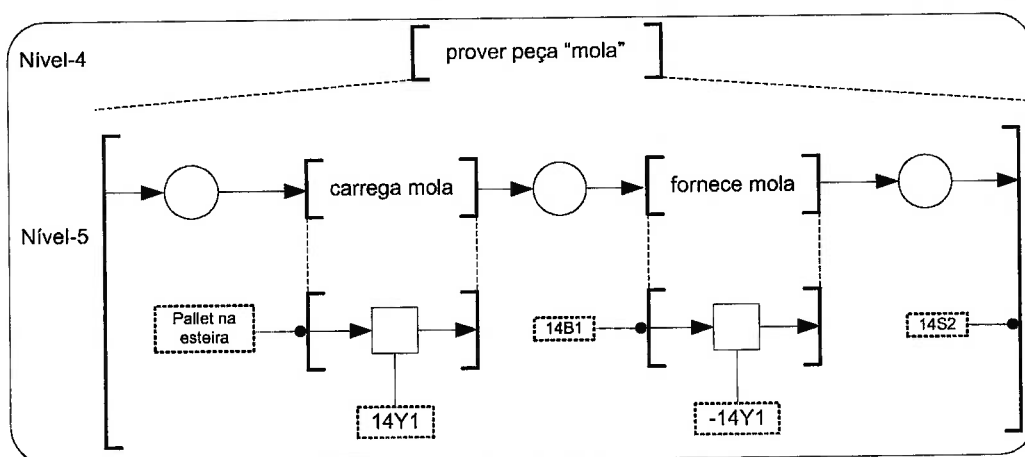


Figura B.59. Detalhamento em PFS do depósito de molas

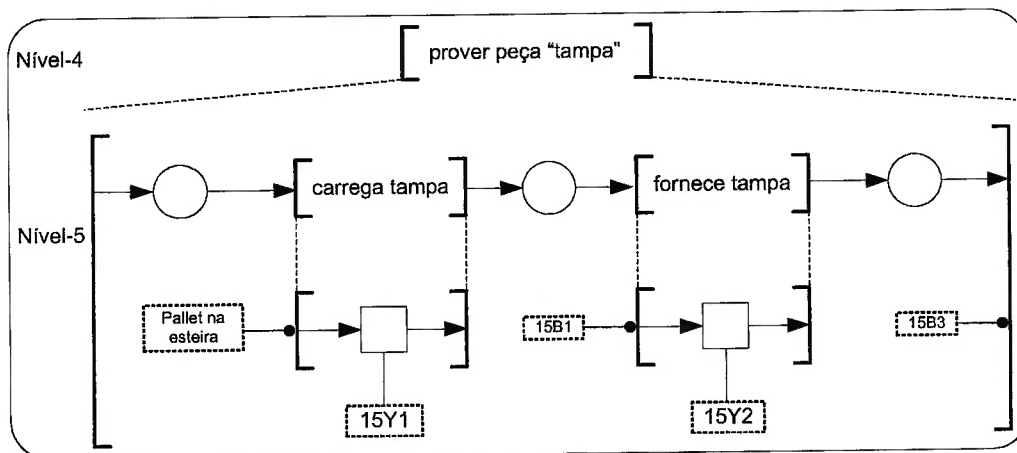


Figura B.60. Detalhamento em PFS do depósito de tampas

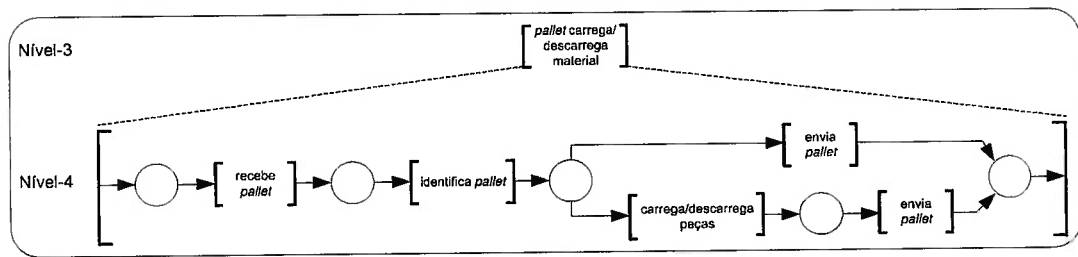


Figura B.61. Detalhamento em PFS do sistema de transporte (T).

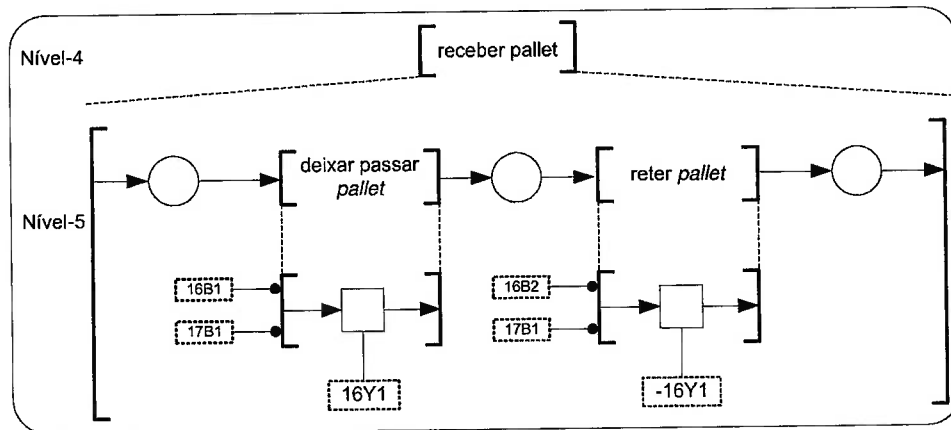


Figura B.62. Detalhamento em PFS da recepção de pallets

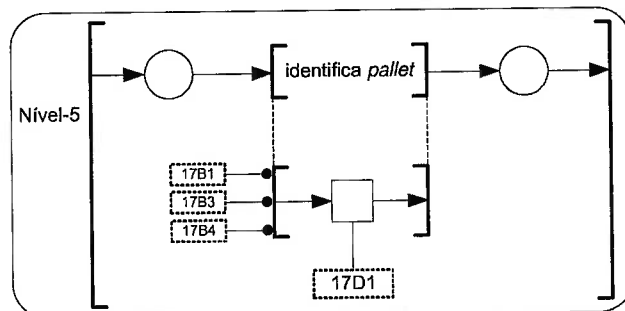


Figura B.63. Detalhamento em PFS da identificação do pallet

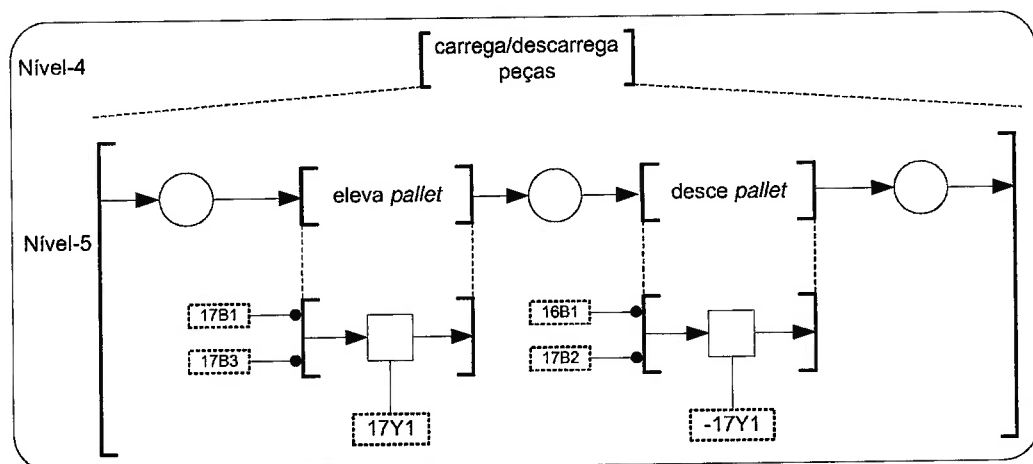


Figura B.64. Detalhamento em PFS do pallet carregando/descarregando peças

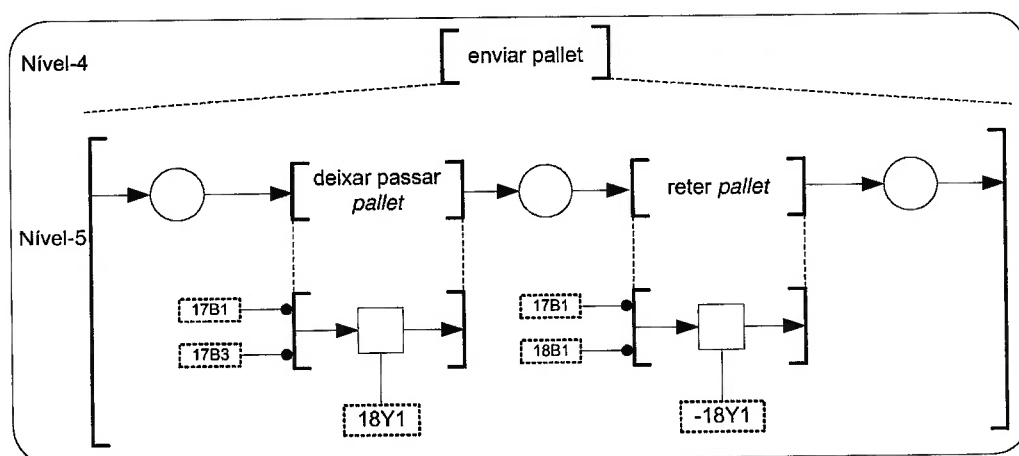


Figura B.65. Detalhamento em PFS da liberação do *pallet*

B.3. Listagem dos dispositivos

Tabela B.1. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (Su).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
1A	retira a peça "corpo" do seu depósito	cilindro pneumático de dupla ação
2A	pega a peça "corpo" para seu transporte	gerador de vácuo e ventosa
3A	transporta a peça "corpo" para estação seguinte	cilindro pneumático giratório de dupla ação (braço basculante)

Tabela B.2. Lista dos dispositivos de atuação da estação (Su).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
1Y1	altera estado de válvula* 1.3 para posição de pistão recuado	solenóide
2Y1	altera estado de válvula ⁺ 2.2 para posição de ativar gerador de vácuo	solenóide
2Y2	altera estado de válvula ⁺ 2.4 para posição de desativar gerador de vácuo	solenóide
3Y1	altera estado de válvula [#] 3.2 para posição de braço na estação de alimentação	solenóide
3Y2	altera estado de válvula [#] 3.4 para posição de braço na estação de teste	solenóide

Tabela B.3. Lista dos dispositivos de detecção da estação (Su).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
1B1	detecta se pistão está recuado (retirou e retém peça "corpo")	sensor magnético de proximidade
1B2	detecta se pistão está estendido (carrega peça "corpo" do depósito)	sensor magnético de proximidade
1B3	detecta falta de peça "corpo" no depósito	sensor óptico
2B1	detecta se a garra ventosa pegou peça "corpo"	vacuostato
3S1	detecta se braço basculante está posicionado na estação de alimentação	sensor fim de curso

* válvula de 5/2 vias com acionamento pneumático e retorno por solenóide

+ válvula de 5/2 vias acionada por solenóide e retorno por solenóide

válvula de 3/2 vias com acionamento pneumático e retorno por solenóide

3S2	detecta se o braço basculante está posicionado na estação de teste	sensor fim de curso
-----	--	---------------------

Tabela B.4. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (Te).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
4A	sobe a peça “corpo” para seu teste	cilindro pneumático de dupla ação
5A	expulsa a peça “corpo” da estação de teste	cilindro pneumático de dupla ação
6A	mede altura da peça “corpo”	cilindro pneumático de dupla ação

Tabela B.5. Lista dos dispositivos de atuação da estação (Te).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
4Y1	altera estado da válvula [#] 4.2 para posição de elevador acima	solenóide
4Y2	altera estado da válvula [#] 4.4 para posição de elevador abaixo	solenóide
5Y1	altera estado da válvula* 5.3 para posição de pistão recuado	solenóide
6Y1	altera estado da válvula* 6.2 para posição de pistão estendido	solenóide

Tabela B.6. Lista dos dispositivos de detecção da estação (Te).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
4B1	detecta módulo elevador arriba	sensor magnético de proximidade
4B2	detecta módulo elevador embaixo	sensor magnético de proximidade
4B3	detecta peça “corpo” prata	sensor indutivo
4B4	detecta peça “corpo” preta, prata e rosa.	sensor capacitivo
4B5	detecta peça “corpo” prata e rosa	sensor óptico
5B1	detecta pistão recuado (posição que não expulsa peça “corpo” do módulo elevador)	sensor magnético de proximidade

[#] válvula de 3/2 vias com acionamento pneumático e retorno por solenóide

* válvula de 5/2 vias com acionamento pneumático e retorno por solenóide

6B1	detecta pistão estendido (posição medindo altura da peça “corpo”)	sensor magnético de proximidade
6B2	Identifica peça “corpo” com boa altura	potenciômetro de deslocamento lineal

Tabela B.7. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (As).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
12A	retém a peça “corpo” para montagem	cilindro pneumático de simples ação
13A	fornece a peça “êmbolo” preta ou prata	cilindro pneumático giratório de dupla ação
14A	fornece a peça “mola”	cilindro pneumático de dupla ação
15A	fornece a peça “tampa”	cilindro pneumático de dupla ação

Tabela B.8. Lista dos dispositivos de atuação da estação (As).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
12Y1	altera estado da válvula [#] 12.3 para posição de pistão recuado	solenóide
13Y1	altera estado de válvula* 13.2 para carregar êmbolo preto	solenóide
13Y2	altera estado de válvula ⁺ 13.4 para carregar êmbolo prata	solenóide
14Y1	altera estado de válvula* 14.3 para posição de pistão recuado	solenóide
15Y1	altera estado de válvula ⁺ 15.2 para posição de pistão estendido	solenóide
15Y2	altera estado de válvula ⁺ 15.3 para posição de pistão recuado	solenóide

Tabela B.9. Lista dos dispositivos de detecção da estação (As).

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
13B1	detecta se o cilindro giratório está carregando peça “êmbolo” preta	sensor magnético de proximidade

[#] válvula de 3/2 vias com acionamento pneumático e retorno por solenóide

* válvula de 5/2 vias com acionamento pneumático e retorno por solenóide

⁺ válvula de 5/2 vias acionada por solenóide e retorno por solenóide

13B2	detecta se o cilindro giratório está carregando peça “êmbolo” prata	sensor magnético de proximidade
13B3	detecta presença de peça “êmbolo”preta ou prata no fornecimento da montagem	sensor ótico
14B1	detecta se pistão recuado carregando mola	sensor magnético de proximidade
14S2	detecta se pistão estendido está fornecendo peça “mola”	sensor fim de curso
15B1	detecta pistão estendido carregando peça “tampa”	sensor magnético de proximidade
15B2	detecta pistão recuado fornecendo peça “tampa”	sensor magnético de proximidade
15B3	detecta presença de peça “tampa” no fornecimento da montagem	sensor óptico

Tabela B.10. Lista dos acionamentos associados aos dispositivos da estação (Ro)

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
7A	agarra o <i>pallet</i> e as peças para montagem	cilindro pneumático de dupla ação
8A	gira a garra de 0° a 270°	cilindro pneumático giratório de dupla ação
9A	movimenta o braço robótico no eixo X	braço robótico em X
10A	movimenta o braço robótico no eixo Y	braço robótico em Y
11A	movimenta o braço robótico no eixo Z	braço robótico em Z

Tabela B.11. Lista dos dispositivos de atuação da estação (Ro)

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
7Y1	altera estado da válvula ⁺ 7.2 para posição de garra aberta	válvula solenóide
7Y2	altera estado da válvula ⁺ 7.4 para posição de garra fechada	válvula solenóide
8Y1	altera estado da válvula ⁺ 8.2 para posição de garra em 0° ou -270°	válvula solenóide
8Y2	altera estado da válvula ⁺ 8.4 para posição de garra a 270°	válvula solenóide

⁺ válvula de 5/2 vias acionada por solenóide e retorno por solenóide

9M1	altera giro do motor 9A para sentido horário (deslocamento no eixo X)	servo-motor
9M2	altera giro do motor 9A para sentido anti-horário (deslocamento no eixo X)	servo-motor
10M1	altera giro do motor 10A para sentido horário (deslocamento no eixo Y)	servo-motor
10M2	altera giro do motor 10A para sentido anti-horário (deslocamento no eixo Y)	servo-motor
11M1	altera giro do motor 11A para sentido horário (deslocamento no eixo Z)	servo-motor
11M2	altera giro do motor 11A para sentido anti-horário (deslocamento no eixo Z)	servo-motor

Tabela B.12. Lista dos dispositivos de detecção da estação (Ro)

nomenclatura	Função	tipo de dispositivo
7B1	detecta garra aberta do braço robótico	sensor magnético de proximidade
7B2	detecta garra fechada do braço robótico	sensor magnético de proximidade
8B1	detecta ter girado garra do braço robótico em sentido anti-horário a 0°	sensor magnético de proximidade
8B2	detecta ter girado garra do braço robótico em sentido horário a 270°	sensor magnético de proximidade
9D2	detecta posição do braço robótico no eixo X que agarra ou deixa <i>pallet</i> da esteira	encoder (codificador) incremental
10D2	detecta posição do braço robótico no eixo Y que agarra ou deixa <i>pallet</i> da esteira	encoder (codificador) incremental
9D3	detecta posição no eixo X que deixa peça "corpo" no dispositivo de retenção	encoder (codificador) incremental

10D3	detecta posição do braço robótico no eixo Y que deixa peça "corpo" no dispositivo de retenção	encoder (codificador) incremental
9D4	detecta posição do braço robótico no eixo X que agarra "êmbolo" do depósito de êmbolos	encoder (codificador) incremental
10D4	detecta posição do braço robótico no eixo Y que agarra "êmbolo" do depósito de êmbolos	encoder (codificador) incremental
9D5	detecta posição do braço robótico no eixo X que monta "êmbolo" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
10D5	detecta posição do braço robótico no eixo Y que monta "êmbolo" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
9D6	detecta posição do braço robótico no eixo X que agarra "mola" do depósito de molas	encoder (codificador) incremental
10D6	detecta posição do braço robótico no eixo Y que agarra "mola" do depósito de molas	encoder (codificador) incremental
9D7	detecta posição do braço robótico no eixo X que monta "mola" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
10D7	detecta posição do braço robótico no eixo Y que monta "mola" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
9D8	detecta posição do braço robótico no eixo X que agarra "tampa" do depósito de tampas	encoder (codificador) incremental
10D8	detecta posição do braço robótico no eixo Y que agarra "tampa" do depósito de tampas	encoder (codificador) incremental
9D9	detecta posição do braço robótico no eixo X que monta "tampa" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental

10D9	detecta posição do braço robótico no eixo Y que monta "tampa" na peça "corpo"	encoder (codificador) incremental
9D10	detecta posição do braço robótico no eixo X que deixa ou agarra <i>pallet</i> do dispositivo de fixação	encoder (codificador) incremental
10D10	detecta posição do braço robótico no eixo Y que deixa ou agarra <i>pallet</i> dispositivo de fixação	encoder (codificador) incremental
9D11	detecta posição do braço robótico no eixo X que deixa ou agarra peça "corpo" do <i>pallet</i>	encoder (codificador) incremental
10D11	detecta posição do braço robótico no eixo Y que deixa ou agarra peça "corpo" do <i>pallet</i>	encoder (codificador) incremental
11B1	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 90 mm	sensor magnético de proximidade
11B2	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 160 mm	sensor magnético de proximidade
11B3	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 210 mm	sensor magnético de proximidade
11B4	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 300 mm	sensor magnético de proximidade
11S1	detecta posição do braço robótico no eixo Z a 0 mm	sensor fim de curso
11S2	detecta posição do braço robótico no eixo Z com valor maior a 300 mm	sensor fim de curso

Tabela B.13. Lista dos objetos de controle do sistema de transporte (T)

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
16A	detém o <i>pallet</i> antes de ser posicionado na primeira plataforma	cilindro pneumático de dupla ação
17A	plataforma um eleva o <i>pallet</i> para verificar presença de material	cilindro pneumático de dupla ação
18A	detém o <i>pallet</i> para ser posicionado na primeira plataforma	cilindro pneumático de dupla ação

19A	detém o <i>pallet</i> antes de ser posicionado na segunda plataforma	cilindro pneumático de dupla ação
20A	plataforma dois eleva o <i>pallet</i> para carregar/descarregar material	cilindro pneumático de dupla ação
21A	detém o <i>pallet</i> para ser posicionado na segunda plataforma	cilindro pneumático de dupla ação
22A	detém <i>pallet</i> antes de ser posicionado na terceira plataforma	cilindro pneumático de dupla ação
23A	plataforma três eleva <i>pallet</i> para carregar/descarregar material	cilindro pneumático de dupla ação
24A	detém <i>pallet</i> para ser posicionado na terceira plataforma	cilindro pneumático de dupla ação
25A	deslocar <i>pallet</i> entre células de produção	esteira transportadora de <i>pallets</i>

Tabela B.14. Lista dos dispositivos de atuação do sistema de transporte (T)

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
16Y1	altera estado da válvula* 16.3 que deixa passar <i>pallet</i> para primeira plataforma	solenóide
17Y1	altera estado da válvula* 17.2 que eleva <i>pallet</i>	solenóide
18Y1	altera estado da válvula* 18.3 que deixa sair <i>pallet</i> da primeira plataforma	solenóide
19Y1	altera estado da válvula* 19.3 que deixa passar <i>pallet</i> para segunda plataforma	solenóide
20Y1	altera estado da válvula* 20.2 que eleva <i>pallet</i>	solenóide
21Y1	altera estado da válvula* 21.3 que deixa sair <i>pallet</i> da segunda plataforma	solenóide
22Y1	altera estado da válvula* 22.3 que deixa passar <i>pallet</i> para terceira plataforma	solenóide
23Y1	altera estado da válvula* 23.2 que eleva plataforma	solenóide
24Y1	altera estado da válvula* 24.3 que deixa sair <i>pallet</i> da terceira plataforma	solenóide
25M1	desloca <i>pallet</i> no trecho Tx	motor trifásicos (380V) de 1.5 HP
25M2	desloca <i>pallet</i> no trecho Ty	motor trifásicos (380V) de 1.5 HP

* válvula de 5/2 vias com acionamento pneumático e retorno por solenóide

25M3	desloca <i>pallet</i> no trecho Tz	motor trifásicos (380V) de 1.5 HP
------	------------------------------------	-----------------------------------

Tabela B.15. Lista dos dispositivos de detecção do sistema de transporte (T)

nomenclatura	função	tipo de dispositivo
16B1	detecta chegada do <i>pallet</i> à primeira plataforma	sensor magnético de proximidade
16B2	detecta <i>pallet</i> passando para primeira plataforma	sensor magnético de proximidade
17B1	detecta primeira plataforma embaixo	sensor indutivo
17B2	detecta primeira plataforma acima	sensor capacitivo
17B3	detecta <i>pallet</i> estar posicionado na primeira plataforma	sensor capacitivo
17B4	identifica número de <i>pallet</i> que está passando pela primeira plataforma	sensor indutivo
18B1	detecta <i>pallet</i> saído da primeira plataforma	sensor magnético de proximidade
19B1	detecta chegada do <i>pallet</i> à segunda plataforma	sensor magnético de proximidade
19B2	detecta <i>pallet</i> passando para segunda plataforma	sensor magnético de proximidade
20B1	detecta segunda plataforma embaixo	sensor indutivo
20B2	detecta segunda plataforma acima	sensor capacitivo
20B3	detecta <i>pallet</i> estar posicionado na segunda plataforma	sensor capacitivo
20B4	identifica número de <i>pallet</i> que está passando pela segunda plataforma	sensor capacitivo
21B1	detecta <i>pallet</i> saído da segunda plataforma	sensor magnético de proximidade
22B1	detecta chegada do <i>pallet</i> à terceira plataforma	sensor magnético de proximidade
22B2	detecta <i>pallet</i> passando para terceira plataforma	sensor magnético de proximidade
23B1	detecta terceira plataforma embaixo	sensor indutivo
23B2	detecta terceira plataforma acima	sensor capacitivo
23B3	detecta <i>pallet</i> estar posicionado na terceira plataforma	sensor capacitivo
23B4	identifica número de <i>pallet</i> que está passando pela terceira plataforma	sensor capacitivo
24B1	detecta <i>pallet</i> saído da terceira plataforma	sensor magnético de proximidade

B.4. Integração dos dispositivos: dinâmica do FAS em MFG

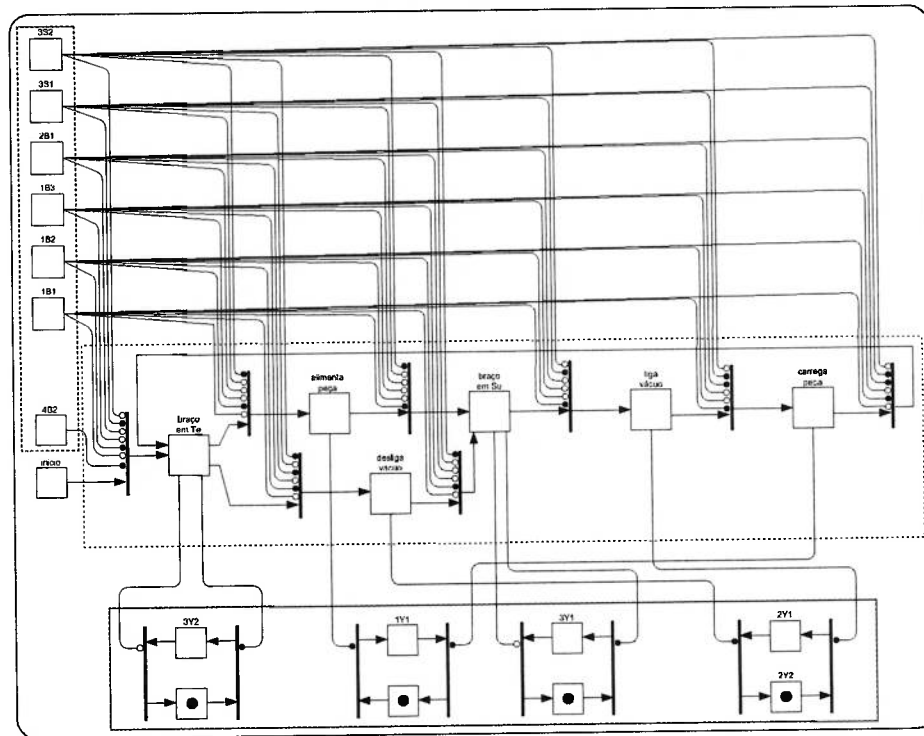


Figura B.66. Integração dos dispositivos da estação (Su)

Tabela B.16. MARCAÇÃO da estação (Su)

MARCAÇÃO DA ESTAÇÃO DE ALIMENTAÇÃO	dispositivo de controle	dispositivo de atuação					dispositivo de detecção														
		P _{in}	P _{te}	P _{ap}	P _{su}	P _{lv}	P _{cp}	P _{dv}	P _{1Y1}	P _{2Y1}	P _{2Y2}	P _{3Y1}	P _{3Y2}	P _{1M1}	P _{1M2}	P _{1M3}	P _{2M1}	P _{3S1}	P _{3S2}	P _{4M2}	
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
braço basculante na estação de teste	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
pistão alimenta e retém peça "corpo"	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
braço basculante na estação de alimentação	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
braço basculante pega peça "corpo"	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
pistão carrega peça "corpo"	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
braço basculante na estação de teste	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
braço basculante solta peça "corpo"	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
braço basculante na estação de alimentação	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0

in = iniciar, te = braço em estação de teste; ap = alimenta peça, su = braço em estação de alimentação; lv = liga vácuo; cp = carrega peça; dv = desliga vácuo

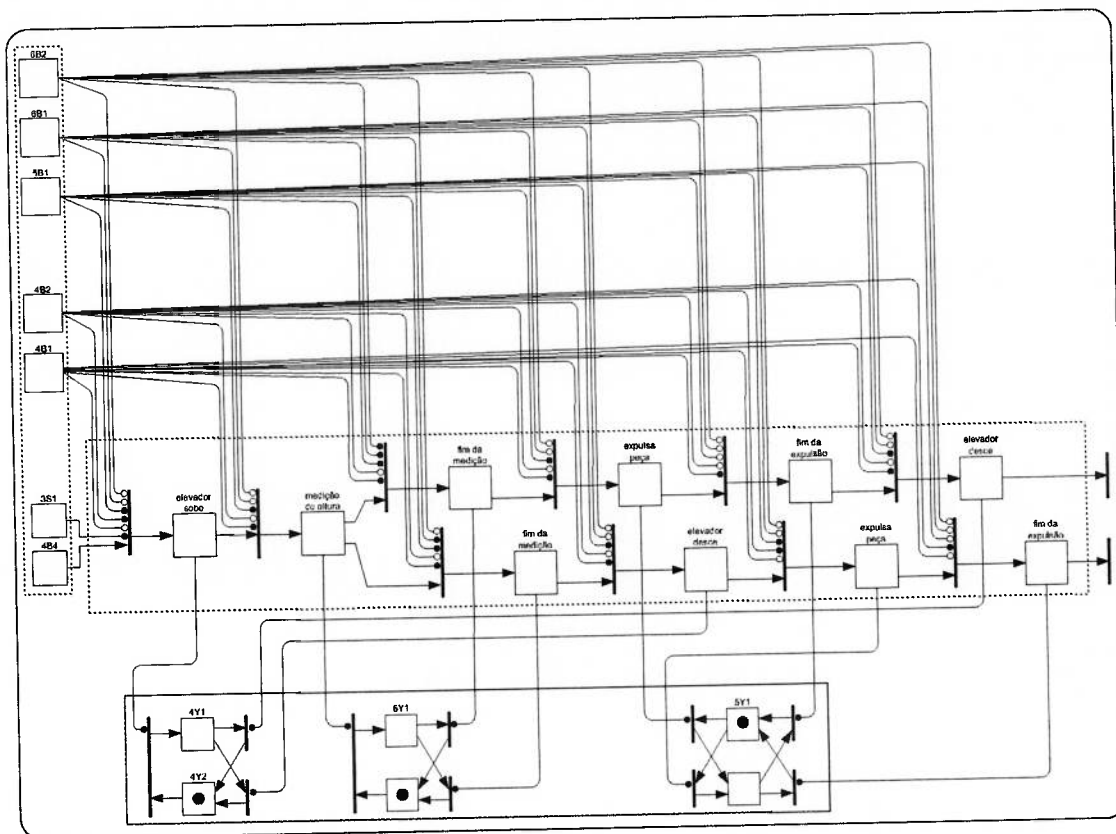


Figura B.67. Integração dos dispositivos da estação (Te)

Tabela B.17. MARCAÇÃO da estação (Te)

MARCAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TESTE	dispositivo de controle						dispositivo de atuação						dispositivo de detecção								
	P _{ei}	P _{ma}	P _{fm1}	P _{fm2}	P _{ep1}	P _{ep2}	P _{fe1}	P _{fe2}	P _{ed1}	P _{ed2}	P _{4Y1}	P _{4Y2}	P _{5Y1}	P _{6Y1}	P _{3S1}	P _{4B1}	P _{4B2}	P _{4B4}	P _{5B1}	P _{6B1}	P _{6B2}
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
elevador sobe peça "corpo"	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
medição de altura da peça "corpo"	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
fim da medição (peça boa)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
expulsa peça "corpo" do elevador	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
fim da expulsão	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
elevador desce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0

ei = elevador sobe; ma = medição de altura; fm1 = fim da medição da peça boa; fm2 = fim da medição da peça ruim; ep1 = expulsa peça boa; ep2 = expulsa peça ruim; fe1 = fim da expulsão (peça boa); fe2 = fim da expulsão (peça ruim); ed1 = elevador desce (peça boa); ed2 = elevador desce (peça ruim)

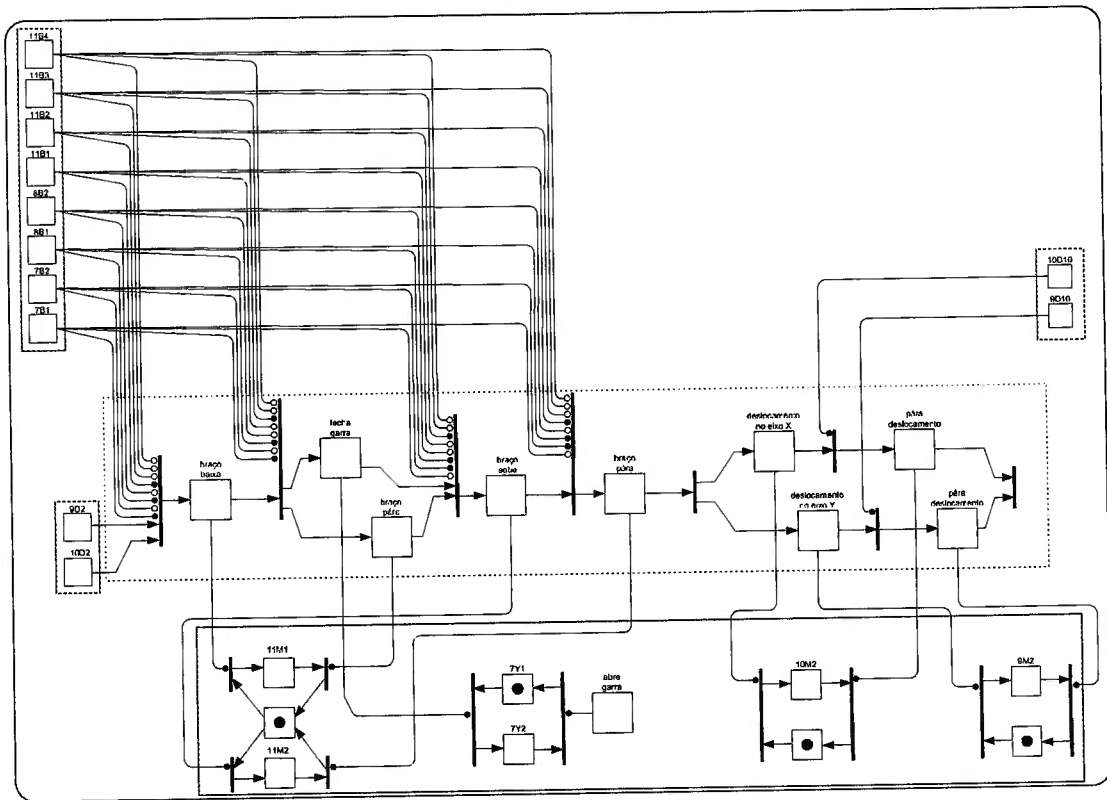


Figura B.68. Integração dos dispositivos do robô para pegar *pallet*.

Tabela B.18. MARCAÇÃO – braço robótico pega *pallet* da esteira

MARCAÇÃO DA POSIÇÃO 2 DO ROBÔ	dispositivo de controle										dispositivo de atuação						dispositivo de detecção													
	P _{1a}	P _{1b}	P _{1c}	P _{1d}	P _{1e}	P _{1f}	P _{1g}	P _{1h}	P _{1i}	P _{1j}	P _{2Y1}	P _{2Y2}	P _{3dX}	P _{3dY}	P _{3dZ}	P _{4dX}	P _{4dY}	P _{4dZ}	P _{5dX}	P _{5dY}	P _{5dZ}	P _{6dX}	P _{6dY}	P _{6dZ}	P _{7dX}	P _{7dY}	P _{7dZ}			
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico para descida e fecha garra	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico para subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
para deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ag = abre garra; fg = fecha garra; dX- = deslocamento negativo no eixo X; pdX = para deslocamento em X; dY- = deslocamento negativo no eixo Y; pdY = para deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço para

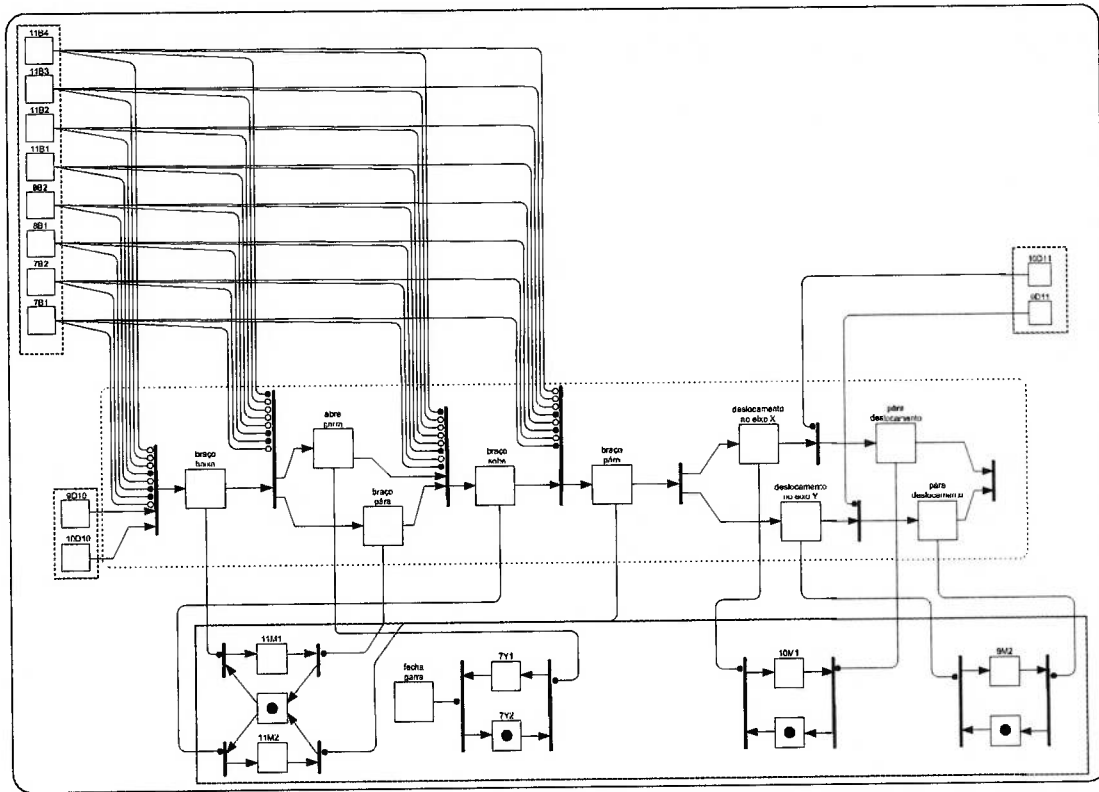


Figura B.69. Integração dos dispositivos do robô para transportar pallet.

Tabela B.19. MARCAÇÃO – braço robótico deixa pallet no dispositivo de fixação

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle						dispositivo de atuação						dispositivo de detecção																	
	P _{3b}	P _{7b}	P _{4ax}	P _{4bx}	P _{4ay}	P _{4by}	P _{3b}	P _{4b}	P _{3b}	P _{7y1}	P _{7y2}	P _{3y2}	P _{10M1}	P _{11M1}	P _{11M2}	P _{7M1}	P _{7M2}	P _{4M1}	P _{4M2}	P _{9M1}	P _{10M1}	P _{9M1}	P _{10M1}	P _{11M1}	P _{11M2}	P _{10M2}	P _{11M2}			
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
braço robótico para descida e abre garra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
braço robótico para subida	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
para deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0

ag = abre garra; fg = fecha garra; dX+ = deslocamento positivo no eixo X; pdX- = para deslocamento em X; dY- = deslocamento negativo no eixo Y; pdY = para deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço para

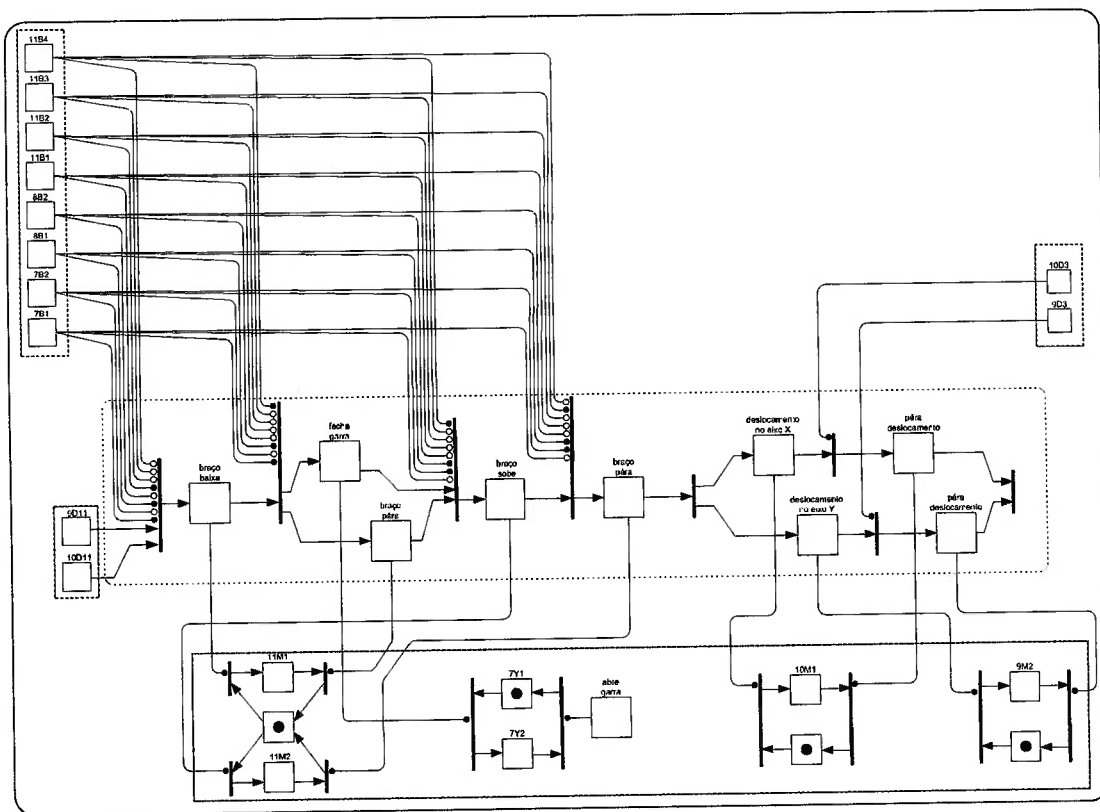


Figura B.70. Integração dos dispositivos do robô para pegar peça “corpo”

Tabela B.20. MARCAÇÃO – braço robótico pega peça “corpo” do pallet

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle									dispositivo de atuação						dispositivo de detecção											
	P _{at}	P _b	P _{dx+}	P _{dx-}	P _{dy+}	P _{dy-}	P _{pb}	P _{sb}	P _{bp}	P _{7Y1}	P _{7Y2}	P _{10M1}	P _{10M2}	P _{10M3}	P _{10M4}	P _{7M1}	P _{7M2}	P _{9M1}	P _{9M2}	P _{11D1}	P _{11D2}	P _{11D3}	P _{11D4}	P _{11D5}	P _{11D6}		
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
braço robótico pára descida e fecha garra	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
braço robótico pára descida e fecha garra	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
braço robótico pára subida	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
pára deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0

ag = abre garra; fg = fecha garra; dx+ = deslocamento positivo no eixo X; pdX = pára deslocamento em X; dY- = deslocamento negativo no eixo Y; pdY = pára deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço pára

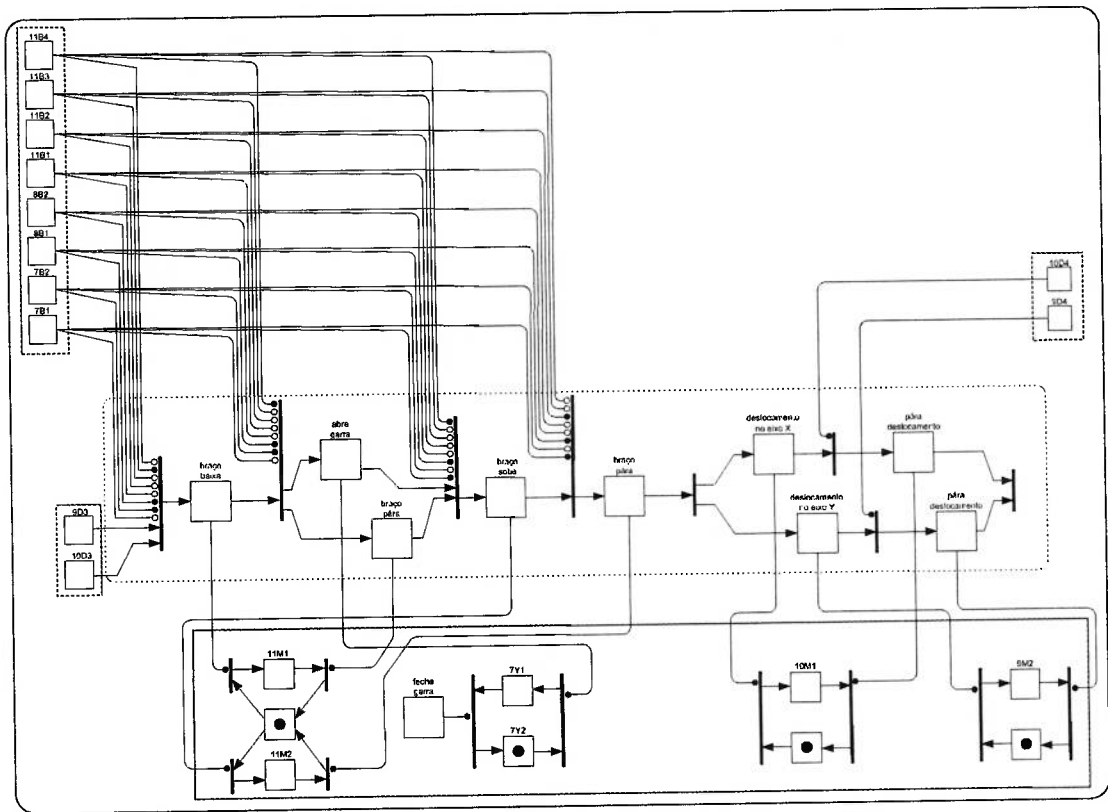


Figura B.71. Integração dos dispositivos do robô para transportar peça “corpo”

Tabela B.21. MARCAÇÃO – braço robótico deixa peça “corpo” no dispositivo de retenção

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle								dispositivo de atuação								dispositivo de detecção											
	P _{ag}	P _{fg}	P _{dx+}	P _{dx-}	P _{dy+}	P _{dy-}	P _{pdX}	P _{pdY}	P _{bb}	P _{sb}	P _{bp}	P _{7V1}	P _{7V2}	P _{10M1}	P _{11M1}	P _{11M2}	P _{7M1}	P _{7M2}	P _{5M1}	P _{5M2}	P _{10M1}	P _{11M1}	P _{11M2}	P _{11M3}	P _{11M4}			
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
braço robótico pára descida e abre garra	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
braço robótico pára descida e abre garra	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
braço robótico pára subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0
deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0
pára deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0

ag = abre garra; fg = fecha garra; dx+ = deslocamento positivo no eixo X; pdX = pára deslocamento em X; dy- = deslocamento negativo no eixo Y; pdY = pára deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço pára

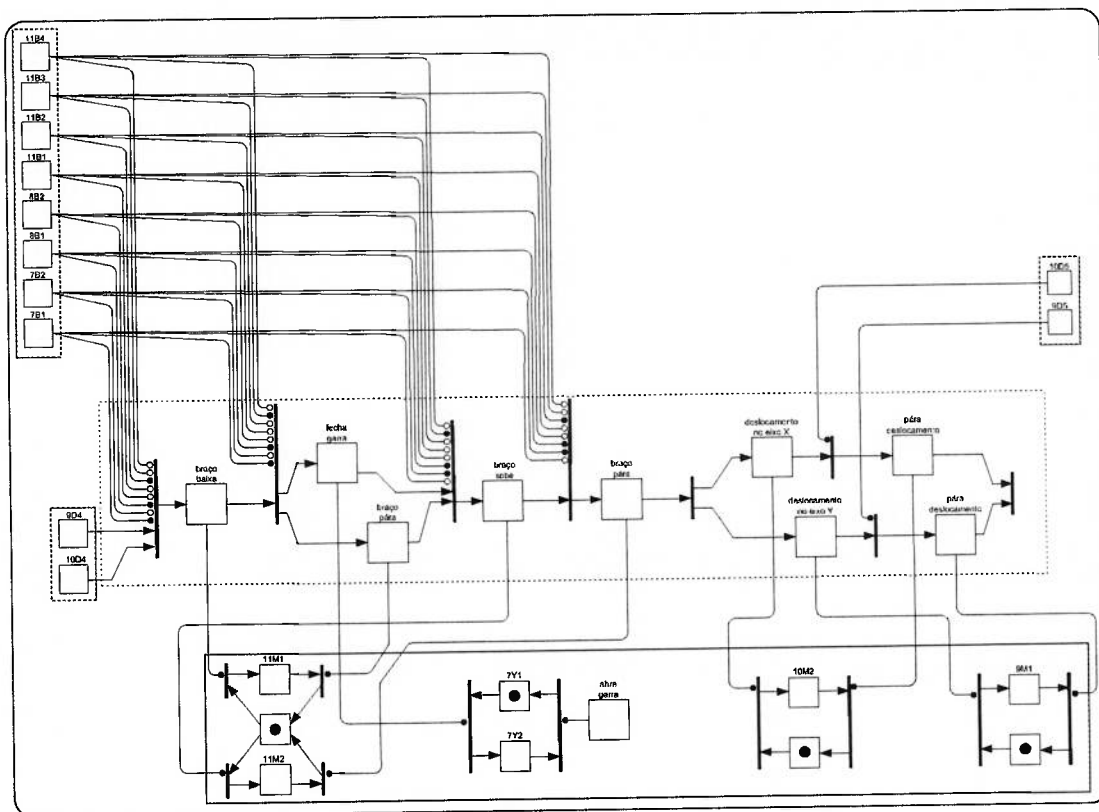


Figura B.72. Integração dos dispositivos do robô para pegar “êmbolo”

Tabela B.22. MARCAÇÃO – braço robótico agarra “êmbolo”

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle						dispositivo de atuação						dispositivo de detecção														
	P _{bx}	P _{fb}	P _{ocx}	P _{max}	P _{ay+}	P _{ay-}	P _{ob}	P _{ac}	P _{bd}	P _{ty1}	P _{ty2}	P _{om1}	P _{10m2}	P _{11m1}	P _{11m2}	P _{7m1}	P _{7m2}	P _{6m1}	P _{6m2}	P _{6m3}	P _{10m4}	P _{6m5}	P _{10m5}	P _{11b1}	P _{11b2}	P _{11b3}	P _{11b4}
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
braço robótico para descida e fecha garra	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
braço robótico para subida	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
deslocamento do braço em X e Y	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
para deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0

ag = abre garra; fg = fecha garra; dx- = deslocamento negativo no eixo X; pdX = para deslocamento em X; dy+ = deslocamento positivo no eixo Y; pdY = para deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço para

Tabela B.23. MARCAÇÃO – braço robótico monta “êmbolo” na peça “corpo”

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle						dispositivo de atuação						dispositivo de detecção															
	P _{ag}	P _{fg}	P _{ax}	P _{px}	P _{ay}	P _{py}	P _{bb}	P _{sb}	P _{bp}	P _{xy1}	P _{xy2}	P _{bx1}	P _{bx2}	P _{bx3}	P _{bx4}	P _{bx5}	P _{bx6}	P _{bx7}	P _{bx8}	P _{bx9}	P _{bx10}	P _{bx11}	P _{bx12}	P _{bx13}	P _{bx14}			
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
braço robótico pára descida e abre garra	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1
	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
braço robótico pára descida e fecha garra	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1
braço robótico pára descida	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1
braço robótico pára descida e abre garra	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
deslocamento do braço em X e Y	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
pára deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0

ag = abre garra; fg = fecha garra; dx- = deslocamento negativo no eixo X; pdX = pára deslocamento em X; dY+ = deslocamento positivo no eixo Y; pdY = pára deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço pára

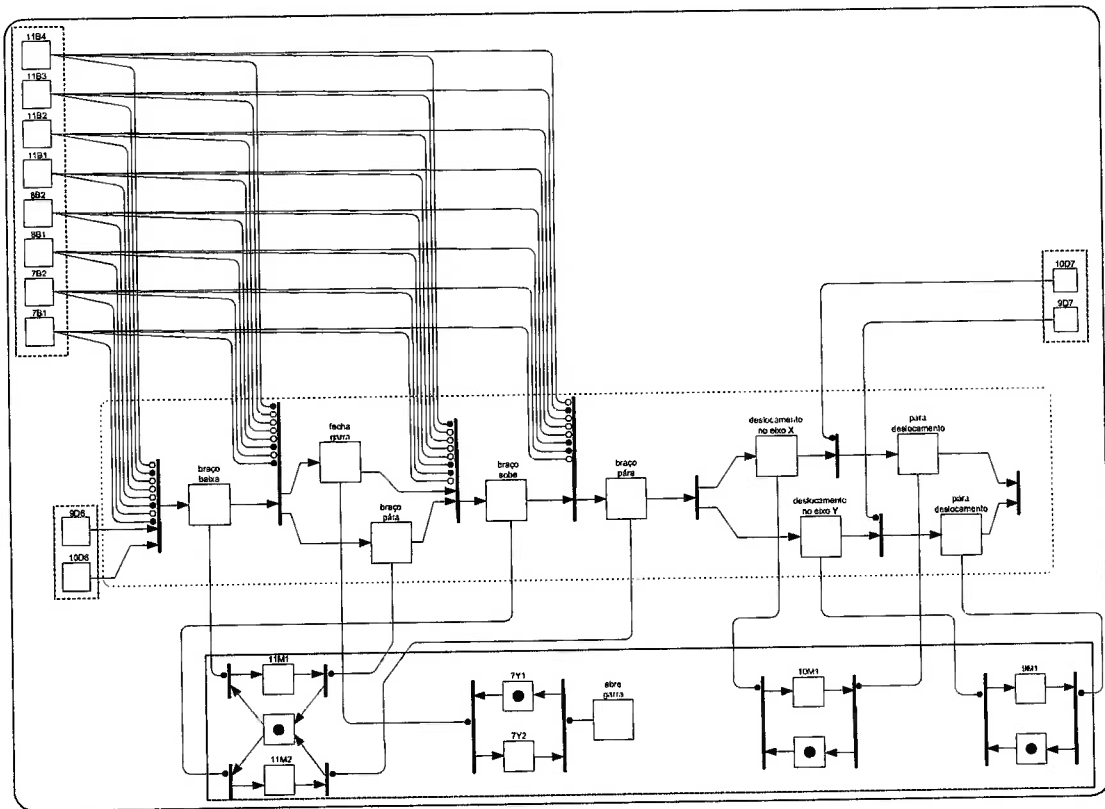


Figura B.74. Integração dos dispositivos do robô para pegar “mola”

Tabela B.24. MARCAÇÃO – braço robótico agarra “mola”

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle								dispositivo de atuação								dispositivo de detecção											
	P _{at}	P _{fb}	P _{dx+}	P _{dx-}	P _{dy+}	P _{dy-}	P _{sb}	P _{bb}	P _{7Y1}	P _{7Y2}	P _{10M1}	P _{10M2}	P _{1M1}	P _{1M2}	P ₁₀₀₁	P ₁₀₀₂	P ₁₀₀₃	P ₁₀₀₄	P ₁₀₀₅	P ₁₀₀₆	P ₁₀₀₇	P ₁₀₀₈	P ₁₀₀₉	P ₁₀₁₀	P ₁₀₁₁	P ₁₀₁₂	P ₁₀₁₃	P ₁₀₁₄
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0		
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0		
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	
braço robótico pára descida e fecha garra	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	
	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
braço robótico pára subida	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
pára deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0

ag = abre garra; fg = fecha garra; dx+ = deslocamento positivo no eixo X; pdX+ = pára deslocamento em X; dy+ = deslocamento positivo no eixo Y; pdY+ = pára deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço pára

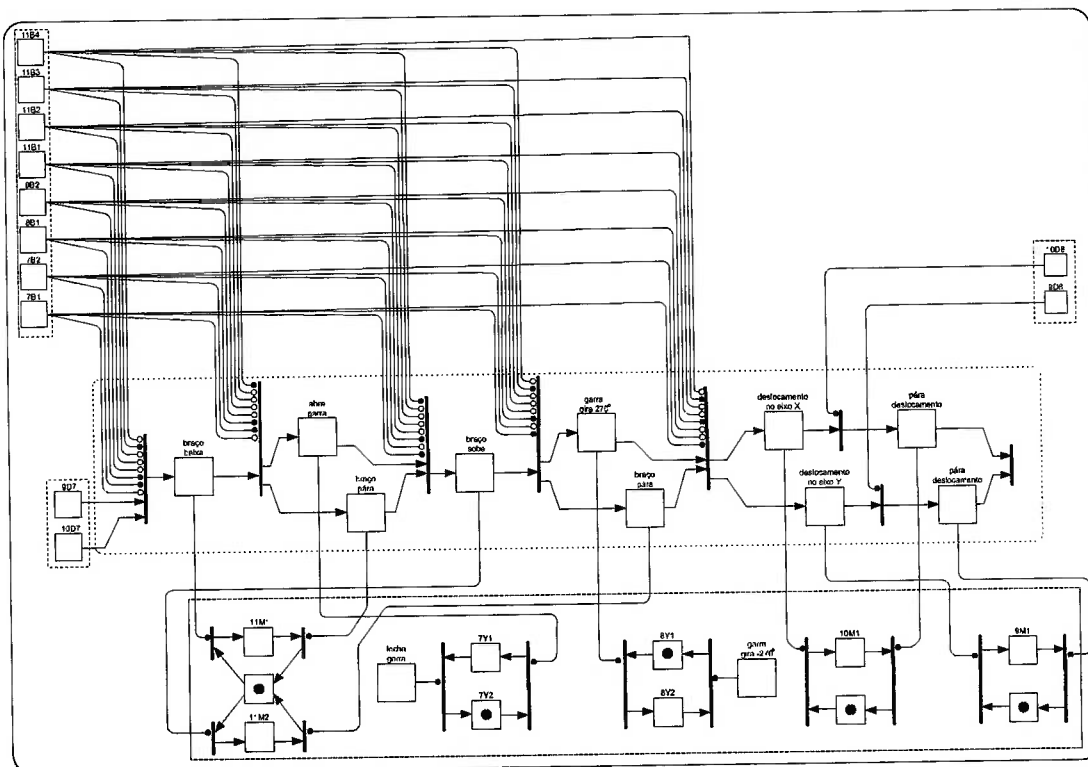


Figura B.75. Integração dos dispositivos do robô para montar “mola”

Tabela B.25. MARCAÇÃO – braço robótico monta “mola” na peça “corpo”

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle										dispositivo de atuação										dispositivo de detecção																					
	P ₁₂	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆	P _{20C}	P _{20A}	P _{20B}	P _{20D}	P _{20E}	P _{20F}	P ₂₁₁	P ₂₁₂	P ₂₁₃	P ₂₁₄	P ₂₁₅	P ₂₁₆	P ₂₁₇	P ₂₁₈	P ₂₁₉	P ₂₂₀	P ₃₁	P ₃₂	P ₃₃	P ₃₄	P ₃₅	P ₃₆	P ₃₇	P ₃₈	P ₃₉	P ₄₀	P ₄₁	P ₄₂	P ₄₃	P ₄₄	P ₄₅	P ₄₆	P ₄₇	P ₄₈	P ₄₉	P ₅₀		
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
braço robótico pára descida e abre garra	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
braço robótico pára subida e gira 270°	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
pára deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

ag = abre garra; fg = fecha garra; g+ = garra gira 270 graus; g- = garra gira -270 graus; dx+ = deslocamento positivo no eixo X; pdX = pára deslocamento em X; dy+ = deslocamento positivo no eixo Y; pdY = pára deslocamento em Y; hb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço pára

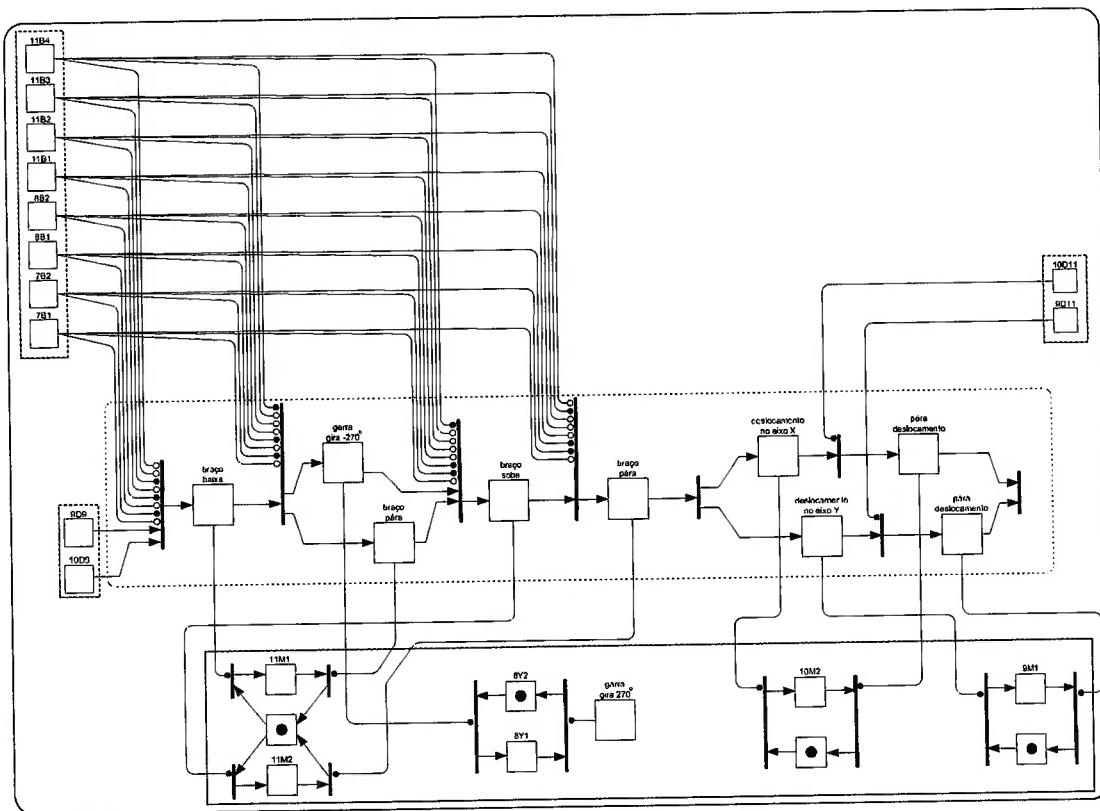


Figura B.77. Integração dos dispositivos do robô para fixar “tampa”

Tabela B.27. MARCAÇÃO – braço robótico fixa “tampa” na peça “corpo”

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle								dispositivo de atuação								dispositivo de detecção							
	P ₃₊	P ₃₋	P _{exc}	P _{10X}	P _{10Y}	P _{10Z}	P ₈	P ₉	P _{11M1}	P _{11M2}	P _{11M3}	P _{11M4}	P _{11M5}	P _{11M6}	P _{11M7}	P _{11M8}	P _{11M9}	P _{11M10}	P _{11M11}	P _{11M12}	P _{11M13}	P _{11M14}		
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	
braço robótico gira -270° e fecha garra	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	
braço robótico pára subida	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	
deslocamento do braço em X e Y	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	
pára deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	

g+ = garra gira 270 graus; g- = garra gira -270 graus; dX- = deslocamento negativo no eixo X; pdX = pára deslocamento em X; dY+ = deslocamento positivo no eixo Y; pdY = pára deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço pára; 9D9 e 10D9 = D9; 9D11 e 10D11 = D11

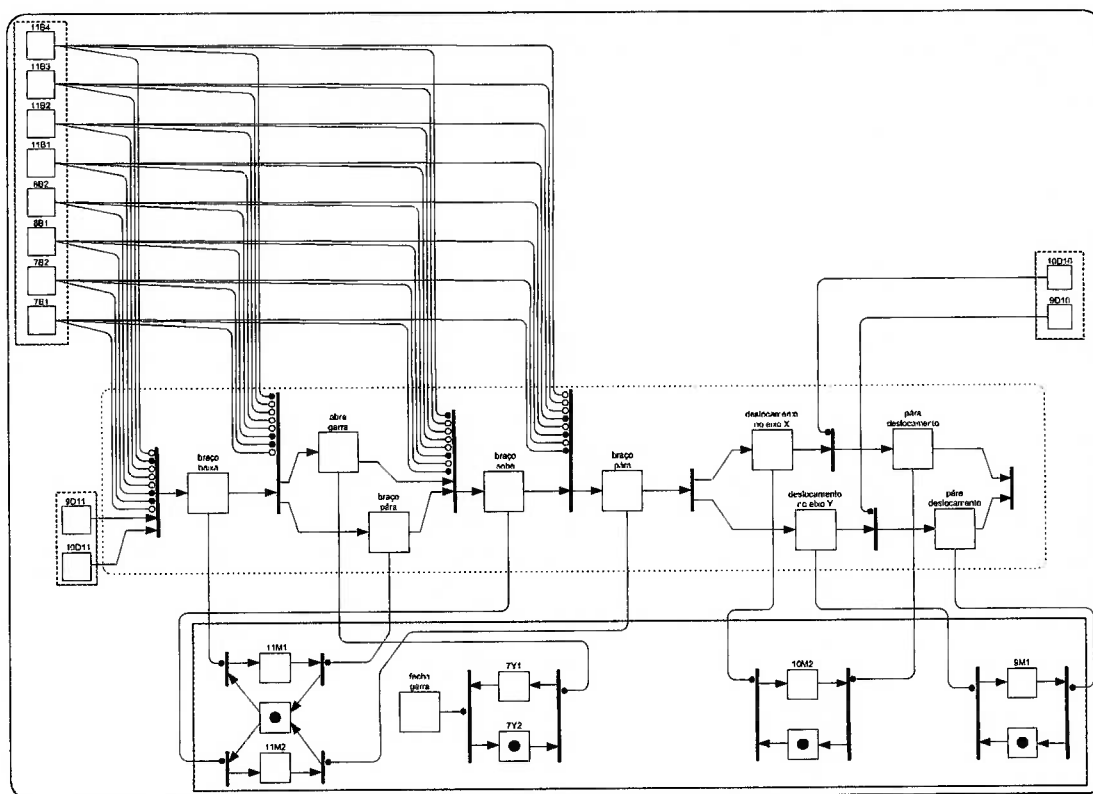


Figura B.78. Integração dos dispositivos do robô para deixar peça montada

Tabela B.28. MARCAÇÃO – braço robótico deixa peça montada no *pallet*

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle								dispositivo de atuação										dispositivo de detecção											
	P _{ag}	P _{fg}	P _{agx}	P _{agx+}	P _{agx-}	P _{agp}	P _{agb}	P _{agc}	P _{agv}	P _{agv1}	P _{agv2}	P _{agv3}	P _{agv4}	P _{agv5}	P _{agv6}	P _{agv7}	P _{agv8}	P _{agv9}	P _{agv10}	P _{agv11}	P _{agv12}	P _{agv13}	P _{agv14}	P _{agv15}	P _{agv16}	P _{agv17}	P _{agv18}	P _{agv19}	P _{agv20}	
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico desce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico pára descida e abre garra	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico sobe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
braço robótico pára subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
pára deslocamento do braço em X e Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ag = abre garra; fg = fecha garra; dX- = deslocamento negativo no eixo X; pdX = pára deslocamento em X; dY+ = deslocamento positivo no eixo Y; pdY = pára deslocamento em Y; bb = braço baixa; sb = sobre braço; bp = braço pára

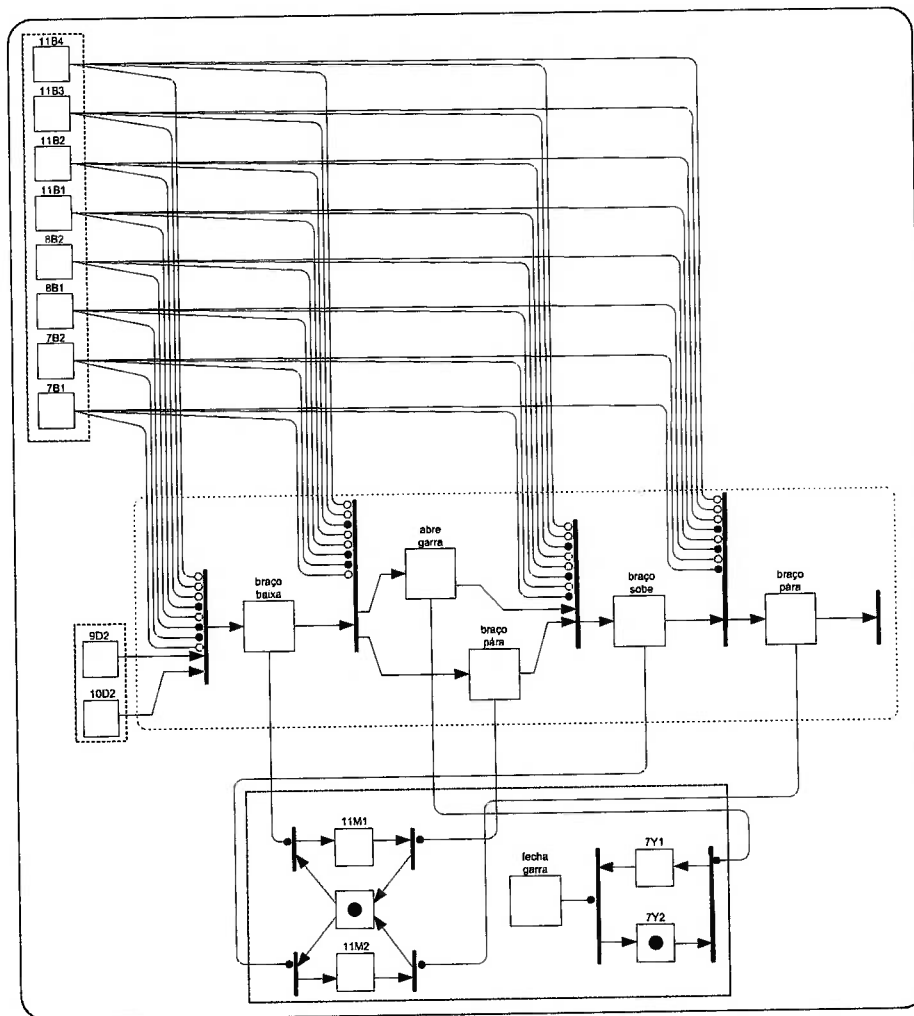
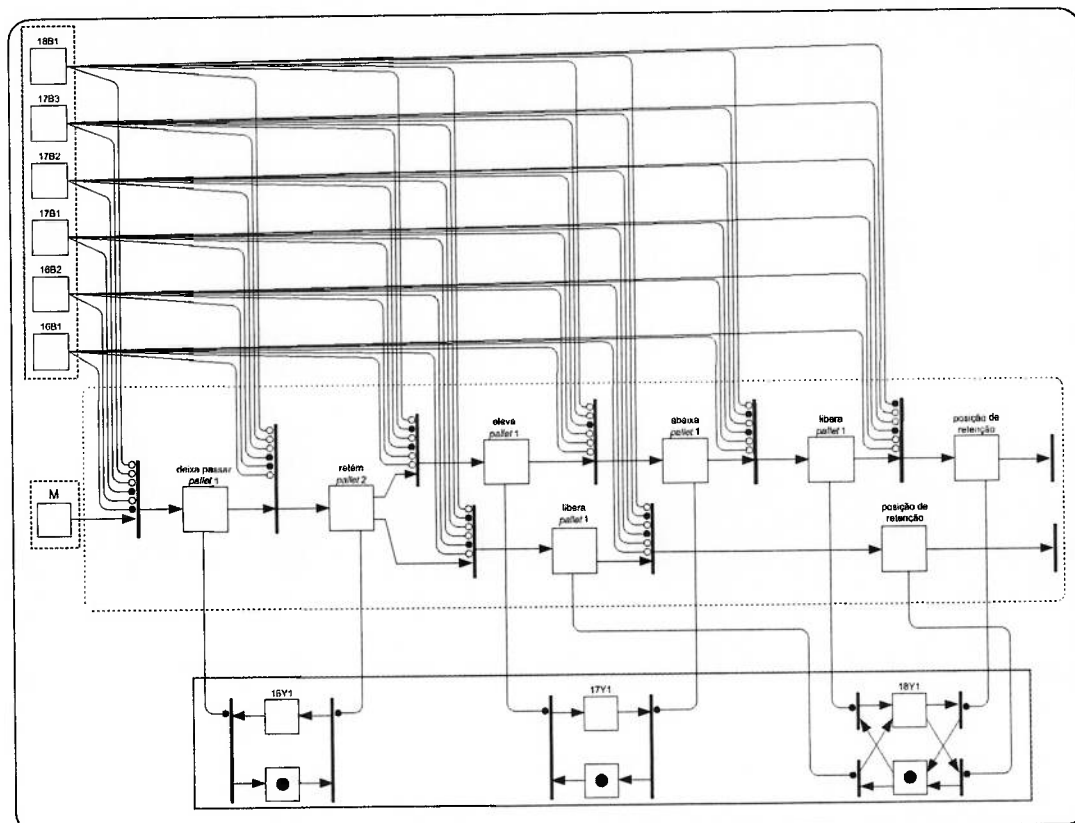


Figura B.80. Integração dos dispositivos do robô para deixa *pallet*

Tabela B.30. MARCAÇÃO – braço robótico deixa *pallet* na esteira

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle					dispositivo de atuação				dispositivo de detecção							
	P _{1E}	P _{ag}	P _{hh}	P _{sb}	P _{hp}	P _{7Y1}	P _{7Y2}	P _{11M1}	P _{11M2}	P _{7D1}	P _{7D2}	P _{8D1}	P _{8D2}	P _{11B1}	P _{11B2}	P _{11B3}	P _{11B4}
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
braço robótico desce	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
braço robótico pára descida e abre garrã	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
braço robótico sobe	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
braço robótico pára subida	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0

ag = abre garrã; fg = fecha garrã; bb = braço baixa; sb = sobe braço; bp = braço pára



M = Motores da esteira ligados

Figura B.81. Integração dos dispositivos do sistema de transporte (T)

Tabela B.31. MARCAÇÃO do sistema de transporte (T)

MARCAÇÃO DO PROCESSO	dispositivo de controle								dispositivo de atuação			dispositivo de detecção						
	P _{pp}	P _{rt}	P _{ep}	P _{ap}	P _{lp}	P _{pr}	P _{lp1}	P _{pr1}	P _{16Y1}	P _{17Y1}	P _{18Y1}	P _M	P _{16B1}	P _{16B2}	P _{17B1}	P _{17B2}	P _{17B3}	P _{18B1}
MARCAÇÃO inicial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
pistão 1 deixa passar pallet 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
pistão 1 retém pallet 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
plataforma eleva pallet 1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
plataforma baixa pallet 1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
pistão 2 libera pallet 1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
pistão 2 em posição de retenção de pallets	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

pp = passa pallet; rp = retém pallet; ep = eleva pallet; ap = abaixa pallet; lp = libera pallet; pr = posição de retenção de pallet; lp1 = libera pallet (não carrega peça); pr1 = posição de retenção de pallet (não carrega peça)

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMOU, M.; ZERHOUNI, S.N.; BOURJAULT, A. Hierarchical modeling and control of flexible assembly systems using object-oriented Petri nets. *Computer Integrated Manufacturing*, v. 11, n.1, p. 18-33, 1998.
- ALCORTA-GARCÍA, E.; SAUCEDO-FLORES, S. Fault detection and isolation based on Takagi-Sugeno modelling. *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, p. 673-678, 2003.
- ALTOVA. Accelerates application development and data management projects with software: EDI support.
Disponível em: http://www.altova.com/features_edi_mapforce.html. Acesso em: 10 dez. 2005.
- ARORA, V.; JONE, W.B.; HUANG, D.C. A parallel built-in self-diagnostic method for nontraditional faults of embedded memory arrays. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 53, n.4, p. 915-932, 2004.
- ARUNACHALAM, V. Electronic data interchange: an evaluation of alternative organizational forms, *Accounting Organizations and Society*, v. 29, n.3-4, p. 227-241, 2004.
- AVIZIENIS, A. et al. Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, v.1, n.1, p.11-33, 2004.
- BASTIDAS, G.D.G. Aplicação de Redes de Petri Interpretadas na Modelagem de Sistemas de Elevadores em Edifícios Inteligentes. 1999. 179p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- BELLGRAN, M.; JOHANSSON, C. A method for the design of flexible assembly systems. *International Journal of Production Economics*, v. 41, n.1-3, p. 93-102, 1995.
- BIANCHI, R.A.C.; RILLO, A.H.R.C. Uma Arquitetura de Controle Distribuída para um Sistema de Visão Computacional Propositada. Escola Politécnica-USP, 1997. Disponível em: <http://www.lti.pcs.usp.br/~rbianchi/publications/enia1997.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2005.
- BREMER, C.F.; LENZA, R.P. Um modelo de referência para gestão da produção em sistemas de produção *assembly to order*: ato e suas múltiplas aplicações. *Gestão e Produção* v.7, n.3, p.269-282, 2000.
- CARDOSO, J.; VALETTE, R. *Redes de Petri*. Florianópolis: ed da UFSC, 1997. 212p.

- CEBALLOS, L.A. Flexibilidade nos Sistemas Produtivos Análise e Critérios de avaliação. 1992. 111p. Dissertação – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.
- CHANG, S.J.; DICESARE, F.; GOLDBOGEN, G. Failure Propagation Tree for Diagnosis in Manufacturing Systems. IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics, v.21, n.4, p.767-776, 1991.
- CHEN, J.; HOWELL, J. A self-validating control system based approach to plant fault detection and diagnosis. Computers and Chemical Engineering, v. 25, p. 337-358, 2001.
- CHETTY, O.V.K.; GNANASEKARAN, O.C. Modelling, Simulation and Scheduling of Flexible Assembly Systems with Colored Petri Nets. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 11, n.6, p. 430-438, 1996.
- CLETO, M.G. A Gestão da Produção nos últimos 45 anos. FAE Business n.4, 2002. Disponível em:
http://www.fae.edu/publicacoes/pdf/revista_fae_business/n4_dezembro_2002/tecnologia1_a_gestao_da_producao_nos_ultimos.pdf. Acesso em: 10 nov. 2005.
- CURY, J.E.R. Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos. In: 5. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Canela-RS, 2001. Anais eletrônicos. Canela-RS: UFSC, 2001. 68p. Disponível em:
<<http://www.das.ufsc.br/~cury/cursos/apostila.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2004.
- DA SILVA, P.R.; DOS SANTOS, W.E. Automação e Controle Discreto. São Paulo: Érica Ltda., 2003. 235p.
- DASH, S.; VENKATASUBRAMANIAN, V. Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems. Computers in Chemical Engineering, v.24, n.200, p.785-791, 2000.
- DELL'ISOLA, A. J. Value Engineering: Practical Applications... For design, construction, maintenance & operations. Kingston, Mass: R.S. Means Co. 1997.
- DE MORAIS, C.C.; CASTRUCCI, P.L. Engenharia de Automação Industrial: Hardware e Software, Redes de Petri, Sistemas de Manufatura e Gestão da Automação. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2001. 295p.
- EDMONSON, N.F.; REDFORD, A.H. Generic Flexible Assembly System design. Assembly Automation, v. 22, n. 2, p. 139-152, 2002.
- FESTO. Learning Systems for Automation: MPS® 500-FM S, manuals and products. Disponível em:
<http://www.festo-didactic.com/didactic>. Acesso em: 03 dez 2005.

- FRANK, P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical knowledge-based redundancy – a survey and some new results. *Automatica*, v.26, n.3, p.459-474, 1990.
- GUEDES, P.B.; SILVA, M.S.; SÁ, C.A. Implementação de uma célula de montagem flexível. Disponível em:
<http://www.ave.dee.isep.ipp.pt/~mfsilva/files/Artigos/anais.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2005.
- HADJICOSTIS, C.N.; VERGHESE, G.C. Power system monitoring using Petri net embeddings, *IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, v. 147, n.5, p. 299-303, 2000.
- HPSIM, Versão 1.1. Universitaet Bern: Copyright (c) 1999-2001, Henryk Anshuetz. Disponível em:
<http://www.winpesim.de/petrinet/e/hpsim_e.htm>. Acesso em: 10 set.2002.
- ITM - INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA: DEPARTAMENTO DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN. Morelia, México. Fundamentos de las Redes de Petri. Disponível em:
<<http://antares.itmorelia.edu.mx/~fmorales/SisDisII/aRedesPetri01.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2004.
- KÜNZLE, L.A. Controle de Sistemas Flexíveis de Manufatura – Especificação dos níveis equipamento e estações de trabalho. 1990. 270p. Dissertação de Mestrado – Centro Federal de Educação Tecnológico do Paraná. Curitiba, 1990.
- LIRA, D. N. Diagnostico de falhas em sistemas flexíveis de montagem, através das redes de Petri. In: Encontro Nacional, 7, Campinas, 2004. SBPN 2004. Resumos. Campinas. Disponível em: <http://www.sbpn.com.br>. Acesso em 21 jan. 2005.
- LIRA, D. N. Process modeling and fault diagnosis of flexible assembly systems using Petri net. In: International Congress of Mechanical Engineering, 18, Ouro Preto, 2005. COBEM 2005. 1CD-ROM.
- LIU, W.; ARAKAKI, J.; MIYAGI, P.E. MFG/PFS Methodology for the design of flexible manufacturing and assemble systems. In: Congresso Latino-Americano de Controle Automático, SBA. RJ, 1994, p.118-123, 1994.
- LO, K.L.; NG, H.S.; TRECAT, J. Power systems fault diagnosis using Petri nets, *IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, v. 144, n.3, p. 231-236, 1997.
- MACHUCA, J.A.D.; BARAJAS, R.P. The impact of electronic data interchange on reducing bullwhip effect and supply chain inventory costs, *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, v. 40, n.3, p. 209-228, 2004.

- MASSARANI, M.; MATTOS, F.C. A engenharia do valor no desenvolvimento contínuo de produtos. In: Congresso e exposição internacionais da tecnologia da mobilidade, 7., São Paulo, 1998. SAE Brasil'98. São Paulo : SAE, 1998. 6 p.
- MEADORS, K. Secure electronic data interchange over the Internet. IEEE Internet Computing, v. 9, n.3, p. 82-89, 2005.
- MIYAGI, P.E. Controle Programável: Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1996. 194p.
- MOUBRAY, J. Realiability-centred Maintenance. In: PÉREZ, J.C.M. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Disponível em: <<http://www.soporteycia.com.co/articulos/articulo.html>>. Acesso em: 9 jul. 2005.
- MURATA, T. State Equation, Controllability and Maximal Matchings of Petri Nets. IEEE Transactions on Automatic Control, v.22, n.3, p.412-416. 1977.
- MURATA, T. Petri nets: analysis and applications. Proceedings of the IEEE, v. 77, n.4, p. 541-580, 1989.
- OFFODILE, O.F.; MARCY, W.M.; JOHNSON, S.L. Knowledge base design for Flexible Assembly robots. International Journal of Production Research, v. 29, n. 2, p. 318-328, 1991.
- PALMA, P.S. Animación de Especificaciones OÁSIS mediante Redes de Petri Orientadas a Objetos. 2000. 239p. Tese de Doutorado - Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia-España. 2000. Disponível em: <<http://www.dsic.upv.es/users/oom/docs/tesis-palma.pdf>>. Acesso em: 9 dez 2000.
- POWER, Y.; BAHRI P.A. A two-step supervisory fault diagnosis framework. Computer and Chemical Engineering, v.28, n.2004, p.2131-2140, 2004.
- POWER, Y.; BAHRI, P.A. Integration techniques in intelligent operational management: a review, Knowledge-Based Systems, v. 18, n.2-3, p. 89-97, 2005.
- PORTUGAL, P.J.L.M. Avaliação da Confiança no funcionamento de Redes de Campo. 2004 454p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2004.
- PROCK, J. A New technique for Fault detection Using petri Nets, Automatica, v. 27, n.2, p. 239-245, 1991.
- RIASCOS, L.A.M. Metodologia para Detecção e Tratamento de Falhas em Sistemas de Manufatura através de Redes de Petri. 2002. 159p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
- ROSÁRIO, J.M. Princípios de Mecatrônica. São Paulo: Prentice Hall, 2005. 356p.

- SAVE INTERNATIONAL. Function Analysis Systems technique- the basic, 2005. Disponível em: http://www.value-eng.org/pdf_docs/monographs/FAbasics.pdf. Acesso em: 10 nov. 2005.
- SAWIK, T. Loading and scheduling of a flexible assembly system by mixed integer programming. *European Journal of Operational Research*, v. 154, n.1, p. 1-19, 2004.
- SILVA, M. Las Redes de Petri em la Automática y la Información. Madrid: Editorial AC, 1995. 194p.
- THOMAS, J.P.; NISSANKE, N.; BAKER, K.D. A Hierarchical Petri Net Framework for the Representation and Analysis of Assembly. *IEEE Transactions on Robotic and Automation*. v. 12, n.2, p. 269-279. 1996.
- THOMAS, J.P.; NISSANKE, N.; BAKER, K.D. Boundary Models for Assembly Knowledge Representation. *IEEE Transactions on Robotic and Automation*. v. 12, n.2, p. 302-312. 1996.
- VENKATASUBRAMANIAN, V. et al. Process fault detection and diagnosis using neural networks-I. Steady-state processes. *Computers in Chemical Engineering*, v.14, n.7, p.699-712, 1990.
- VILLANI, E. Modelagem e análise de Sistemas Supervisórios híbridos. 2004. 339p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- ZHA, X.F.; DU, H.; LIM, Y.E. Knowledge intensive Petri net framework for concurrent intelligent design of automatic assembly systems. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, v.17, p. 379-398, 2001.
- ZAKNICH, A. Neural networks for intelligent signal processing. Singapore: World Scientific. 2003.