

**EDUARDO ALVES PORTELA SANTOS**

**CONTRIBUIÇÕES AO PROJETO CONCEITUAL DE  
SISTEMAS DE MANIPULAÇÃO E MONTAGEM  
AUTOMATIZADOS**

**FLORIANÓPOLIS**

**2003**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTRIBUIÇÕES AO PROJETO CONCEITUAL DE  
SISTEMAS DE MANIPULAÇÃO E MONTAGEM  
AUTOMATIZADOS**

Tese submetida a Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos de  
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

**EDUARDO ALVES PORTELA SANTOS**

Florianópolis, Julho de 2003.

# CONTRIBUIÇÕES AO PROJETO CONCEITUAL DE SISTEMAS DE MANIPULAÇÃO E MONTAGEM AUTOMATIZADOS

**Eduardo Alves Portela Santos**

‘Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle e Automação*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

José Eduardo Ribeiro Cury, Dr. d’Etat

---

Edson Roberto De Pieri, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

José Eduardo Ribeiro Cury, Dr. d’Etat  
Presidente

---

Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.

---

Carlos Eduardo Trabuco Dórea, Dr.

---

Fernando Antônio Forcellini, Dr. Eng.

---

Marco Antônio Buseti De Paula, Dr. -Ing.

---

Paulo Eigi Miyagi, Dr.

---

Rômulo Silva Oliveira, Dr.

## DEDICATÓRIA

A Pedro, meu filho e meus momentos ternos e eternos, de quem, mesmo tendo-o comigo, é permanente a saudade do presente e do futuro.

A Wilson e Nícia, meus pais, a quem me devo e por terem feito da educação de seus filhos a meta maior de sua vida.

A meus irmãos, André e Wilson Jr., companheiros desde a primeira hora.

À minha cidade, Paulo Afonso-BA, e à Lagoa da Conceição, meus lugares!

## AGRADECIMENTOS

À Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela oportunidade concedida.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela excelência do programa.

Ao professor José Eduardo Ribeiro Cury, pela paciência, dedicação, seriedade e amizade que marcaram seu trabalho como orientador durante a elaboração desta tese. De maneira pouco comum e admirável, o prof. Cury sabe harmonizar erudição, respeitabilidade acadêmica e simplicidade. Deixo aqui manifestada a minha gratidão pelos ensinamentos técnicos e humanos que me foram transmitidos pelo prof. Cury ao longo deste trabalho.

Ao professor Victor Juliano De Negri, pela orientação segura, incentivo e pela convivência agradável e enriquecedora.

Ao colega Max Hering de Queiroz, pela importante contribuição e ajuda emprestada ao trabalho.

Ao colega e professor Marco Buseti, pelo permanente apoio e incentivo.

Ao professor Ronaldo Mayrhofer (*in memoriam*) por haver tornado possível a realização do doutorado.

A todos os amigos que, com palavras, gestos ou ações, incentivaram-me a levar a bom termo este trabalho.

Ao contribuinte brasileiro, meu muito obrigado pela oportunidade de realizar o curso de doutorado numa instituição pública e de qualidade.

Resumo da Tese apresentada a UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

## **CONTRIBUIÇÕES AO PROJETO CONCEITUAL DE SISTEMAS DE MANIPULAÇÃO E MONTAGEM AUTOMATIZADOS**

**Eduardo Alves Portela Santos**

Julho/2003

Orientador: José Eduardo Ribeiro Cury, Dr. D'Etat.

Co-orientador: Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.

Área de Concentração: Controle e Automação

Palavras-chave: engenharia de projeto, projeto conceitual, descrição funcional, controle supervisão, sistemas a eventos discretos, sistemas de manipulação e montagem, controle modular.

Número de páginas: 192

A presente pesquisa contribui para o projeto conceitual de sistemas de manipulação e montagem automatizados. A abordagem desenvolvida baseia-se na execução simultânea dos projetos da parte física e de controle de forma a obter uma abordagem integrada conferindo economia de tempo e recursos. Objetiva-se com esta abordagem diminuir o ciclo de desenvolvimento de projeto dos sistemas tratados e ao mesmo tempo aumentar a confiabilidade destes, acarretando uma diminuição do esforço de implementação, integração, testes e manutenção. Nesse sentido, ferramentas formais de análise e síntese são utilizadas no processo de projeto, atendendo à nova proposta do presente trabalho. A etapa de descrição funcional, pertencente ao projeto conceitual, é analisada através de diversos modelos encontrados na literatura, resultando na identificação do poder de representação e das limitações de uso. Um modelo de descrição funcional analisado, a rede Canal Agência, é selecionado em função de sua adequação aos objetivos do presente trabalho. Tal modelo possibilita um tratamento coerente da descrição funcional com o modelo comportamental empregado. Este modelo, oriundo da área de sistemas a eventos discretos, baseado em autômatos e linguagens controláveis, é usado para propiciar um processo automático de síntese de supervisores, ao invés dos usuais procedimentos manuais ou heurísticos. Além desta vantagem, o procedimento de síntese de controladores tem a grande conveniência de ser baseado no modelo da dinâmica do sistema em malha aberta e na especificação do comportamento desejado. Esta abordagem insere a perspectiva comportamental do sistema. Seguindo os fundamentos do presente trabalho consegue-se estabelecer uma metodologia adequada para sistemas de manipulação e montagem automatizados, inserindo conceitos e necessidades próprias.

Abstract of Thesis presented to UFSC as partial fulfillment of the requirements for the Doctor degree in Electrical Engineering.

## **CONTRIBUTIONS TO CONCEPTUAL DESIGN OF AUTOMATED ASSEMBLY AND HANDLING SYSTEMS**

**Eduardo Alves Portela Santos**

July/2003

Advisor: José Eduardo Ribeiro Cury, Dr. D'Etat.

Co-advisor: Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.

Area of Concentration: Control and Automation.

Keywords: design engineering, conceptual design, functional description, supervisory control, discrete event systems, handling and assembly systems, modular control.

Number of pages: 192

The current research contributes to the conceptual design of the automated assembly and handling systems. The developed approach is based on the concurrent performance of the physical and control sections, achieving an integrated approach providing time and resources economy. The purpose of this approach is to decrease the lifespan of the designed system, causing a decrease in implementation efforts, integration, tests and maintenance. In this sense, formal tools of analysis and synthesis are used in the process design, achieving a new approach proposed in the present work. The functional description stage, belonging to conceptual design, is analyzed through the various models found in literature, resulting in the identification of the power of representation and the use limitation of such models. A functional description model analyzed, the Channel Instance net, is selected according to its suitability to the aims of the present work. This model allows a coherent treatment of the functional description with the behavioral model used. The behavioral model, resulting from discrete event systems area, based on automata and controllable languages, is used to propitiate an automatic process of synthesis of supervisors, instead of usual manual and heuristic methods. Besides this advantage, the procedure of controller synthesis has the great convenience of being based on open loop dynamic model of the system and on the specification of the expected behavior. This approach adds the behavioral perspective of the system. Following the basis of the present work it is possible to establish a suitable methodology to automated assembly and handling systems, inserting specific concepts and demands.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 Considerações sobre as abordagens tradicionais de projeto conceitual.....	20
1.2 Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizados (SMMAS).....	22
1.3 Organização do trabalho.....	25
<b>2. PROJETO CONCEITUAL DE SISTEMAS TÉCNICOS.....</b>	<b>26</b>
2.1 Metodologias de projeto de produto e de sistemas técnicos.....	26
2.2 Fases do projeto de sistemas técnicos.....	28
2.3 Descrição funcional na atividade de projeto.....	31
2.3.1 Descrição funcional segundo a escola alemã de projeto.....	32
2.3.2 Descrição funcional segundo a norma VDI 2860 (1990).....	36
2.3.3 Descrição funcional segundo a abordagem denominada “Representação Funcional”.....	39
2.3.4 Descrição funcional segundo a abordagem denominada “Engenharia de Requisitos”.....	41
2.3.5 Descrição funcional segundo uma abordagem de projeto de sistemas mecatrônicos.....	43
2.3.6 Descrição funcional segundo uma abordagem voltada ao projeto de sistemas automáticos.....	48
2.3.7 Descrição funcional segundo a uma abordagem voltada para o projeto de sistemas automatizados de manufatura.....	55
2.4 Conclusões.....	59
<b>3. MODELAGEM E CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS.....</b>	<b>64</b>
3.1 Definição e características.....	65
3.2 Exemplo de sistema a eventos discretos e a problemática de controle.....	67
3.3 Linguagens e autômatos como modelos para SEDs.....	70
3.4 Controle supervisorio de sistemas a eventos discretos.....	76
3.4.1 Condições para a existência de supervisores.....	79
3.5 Controle modular local.....	80
3.5.1 Modelagem de sistemas compostos.....	81
3.5.2 Modularidade local.....	83
3.6 Implementação do controle modular local.....	83
3.6.1 Método passo a passo generalizado.....	84

3.6.2 Implementação de supervisores locais utilizando o método passo a passo.....	87
3.7 Conclusões.....	90
<b>4. ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO CONCEITUAL DE SMMA.....</b>	<b>92</b>
4.1 Modelo procedural do projeto conceitual integrado de SMMA.....	93
4.2 Especificação de projeto.....	94
4.3 Estabelecimento da estrutura funcional global de um SMMA.....	80
4.4 Refinamento da estrutura funcional (decomposição funcional).....	96
4.5 Estabelecimento de variantes de estruturas funcionais.....	99
4.6 Seleção das estruturas funcionais, modelagem das agências e especificações, síntese dos controladores e verificação da modularidade.....	104
4.7 Estabelecimento dos princípios de solução e seqüências operacionais correspondentes.....	94
4.8 Revisão da estrutura funcional e acoplamento das seqüências operacionais à estrutura de controle supervísório.....	110
4.9 Conclusão.....	121
<b>5. ESPECIFICAÇÕES OPERACIONAIS ASSOCIADAS A SMMA.....</b>	<b>122</b>
5.1 Modelo genérico de Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizados.....	123
5.2 Modelagem das agências.....	124
5.3 Especificações relacionadas ao sistema de manipulação ou transporte.....	132
5.3.1 Especificações operacionais utilizando transportadores assíncronos.....	132
5.3.2 Especificações operacionais utilizando transportador síncrono.....	135
5.3.3 Especificações operacionais utilizando transportador síncrono e canal sem atividade.....	138
5.3.4 Especificações operacionais utilizando agências equivalentes na entrada e saída do sistema.....	128
5.4 Especificações relacionadas à junção de subsistemas.....	144
5.5 Especificações relacionadas aos Sistemas de Medição (SM).....	154
5.6 Especificações relacionadas ao controle do número de peças ou partes presentes num SMMA.....	157
5.7 Conclusão.....	161
<b>6. PROJETO CONCEITUAL DE SMMA: ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>164</b>
6.1 Especificação de projeto.....	164
6.2 Estabelecimento da estrutura funcional global.....	166
6.3 Refinamento da estrutura funcional global (decomposição funcional).....	167

6.4 Estabelecimento das variantes de estruturas funcionais.....	171
6.5 Seleção da estrutura funcional, modelagem das agências e especificações operacionais.....	177
6.6 Estabelecimento dos princípios de solução e das seqüências operacionais.....	184
6.7 Revisão da estrutura funcional e acoplamento das seqüências operacionais.....	189
6.8 Conclusão.....	191
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>193</b>
7.1 Contribuições.....	180
7.2 Recomendações.....	198
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>200</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esforço das atividades durante o ciclo de vida de sistemas automatizados (FESTO, 2000b).....	21
Figura 1.2 – Configuração geral de linhas de produção automatizadas (GROOVER, 2001).....	24
Figura 1.3 – Configuração geral de sistemas de montagem automatizados (GROOVER, 2001).....	24
Figura 2.1 – Processo de projeto (adaptado de DE NEGRI, 1996).....	28
Figura 2.2 – Descrição funcional orientada ao fluxo de energia, matéria e informação segundo a escola alemã de projeto de produto.....	33
Figura 2.3 – Máquina de colher batatas (PAHL e BEITZ, 1989).....	36
Figura 2.4 – Símbolos básicos para as funções de manipulação: 1. Manipular (símbolo básico); 2. Armazenar ordenadamente; 3. Armazenar desordenadamente; 4. Armazenar semi-ordenadamente; 5. Ramificar; 6. Unir; 7. Fixar; 8. Liberar; 9. Fixar (sem ação de força); 10. Girar; 11. Rodar; 12. Distribuir (n peças); 13. Posicionar; 14. Deslocar; 15. Selecionar; 16. Despachar em frente; 17. Guiar (mantendo a orientação da peça); 18. Testar; 19. Processar (símbolo básico); 20. Modificar forma; 21. Tratar (modificar propriedades do material); 22. Juntar (montar); 23. Modificar superfície; 24. Testar (símbolo básico).....	37
Figura 2.5 – Exemplo de refinamento funcional segundo VDI 2860 (1990).....	37
Figura 2.6 – Exemplo de processo de refinamento funcional segundo a VDI 2860 (1990).....	38
Figura 2.7 – Relações entre função, comportamento e estados (UMEDA et al., 1990).....	41
Figura 2.8 – Árvore função/mecanismo (SHAKERI, 1998).....	45
Figura 2.9 – Descrição funcional de um sistema mecatrônico (BUUR, 1990).....	46
Figura 2.10 – Estrutura lógica de um toca disco digital.....	47
Figura 2.11 – Modelos utilizados por SHAKERI (1998) para a descrição funcional: a)Árvore função/mecanismo; b) Diagrama de classes para a unidade de rotação (relação entre motor, engrenagem e disco); c)Diagrama de seqüência para a função rotacionar disco; d)Leiaute físico com os dois princípios de solução para a unidade de rotação.....	47
Figura 2.12 – Descrição funcional da unidade de controle de rotação (SHAKERI, 1998): a)Acoplamento entre controlador e unidade de rotação; b)Árvore função/mecanismo para unidade de rotação; c)Diagrama de classes da unidade de rotação; d)Relações entre os objetos constituintes.....	48
Figura 2.13 – Modelo funcional condensado de um sistema automático (DE NEGRI, 1996).....	49
Figura 2.14 – Descrição funcional de uma pequena central hidroelétrica (DE NEGRI e PAES, 2003).....	51
Figura 2.15 – Encaminhamento para o detalhamento da parte de informação de uma central hidroelétrica (DE NEGRI e PAES, 2003).....	52

Figura 2.16 – Rede Canal/Agência (rede C/A).....	53
Figura 2.17 – Representação em rede C/A.....	54
Figura 2.18 – Refinamento e condensação de uma rede C/A.....	55
Figura 2.19 – Metodologia PFS/MFG para projeto de controladores de SEDs (MIYAGI, 1996)....	57
Figura 2.20 – Processo de projeto conceitual de controladores utilizando redes de Petri (MORAES e CASTRUCCI,2001).....	58
Figura 3.1 – Evolução típica de um Sistema a Eventos Discretos.....	65
Figura 3.2 – Sistemas a Variáveis Contínuas e Sistemas a Eventos Discretos.....	67
Figura 3.3 – Unidade de furação, escareamento e execução de chanfro (FESTO, 2000).....	68
Figura 3.4 – Exemplo de autômato com tabela de transição de estados correspondente.....	72
Figura 3.5 – Autômatos: a) não bloqueante e b) bloqueante.....	74
Figura 3.6 – Operação de composição de autômatos (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999)....	75
Figura 3.7 – Acoplamento da planta e supervisor no modelo RW (RAMADGE e WONHAM, 1989).....	77
Figura 3.8 – Alfabeto de eventos de um sistema composto.....	83
Figura 3.9 – a) Elementos principais do diagrama funcional (IEC 848); b) Diagrama lógico correspondente ao passo n.....	85
Figura 3.10 – Princípio de solução por programação correspondente à lógica dos passos.....	86
Figura 3.11 – Princípio de solução elétrico para lógica dos passos.....	86
Figura 3.12 – Princípio de solução pneumático para a lógica dos passos.....	87
Figura 3.13 – Estrutura básica do sistema de controle (QUEIROZ et al., 2001).....	87
Figura 3.14 – Diagrama funcional e blocos lógicos correspondentes ao autômato <i>Gi</i> .....	88
Figura 3.15 – Diagrama funcional e bloco lógico do supervisor.....	89
Figura 3.16 – Diagrama funcional e bloco lógico da seqüência operacional.....	90
Figura 4.1 – Projeto conceitual proposto para SMMA.....	94
Figura 4.2 – Estrutura funcional genérica de um SMMA em projeto.....	96
Figura 4.3 – Ilustração do processo de refinamento de uma estrutura funcional genérica.....	99
Figura 4.4 – Exemplo de estabelecimento de variantes funcionais através de modificação da estrutura da rede C/A.....	101
Figura 4.5 – Exemplo de estabelecimento de variantes funcionais de acordo com a forma de implementação de determinadas agências.....	102
Figura 4.6 – Agências realizadas pelo mesmo princípio de solução e candidatos possíveis a implementação de tal princípio.....	103
Figura 4.7 – Exemplo de condensação de agências similares.....	104
Figura 4.8 – Exemplo de modelo comportamental de uma agência.....	106
Figura 4.9 – Descrição funcional de um SMMA.....	107

Figura 4.10 – Supervisores locais para o exemplo apresentado na figura 4.9.....	108
Figura 4.11 – Estrutura de controle obtida na etapa de descrição funcional.....	109
Figura 4.12 – Princípios de soluções para as funções: a,b)montar, c)empacotar e d)colar (FESTO, 2000a).....	113
Figura 4.13 – Princípios de soluções para diversas funções (BOLLMANN, 1997).....	113
Figura 4.14 – Seqüência operacional do sistema de colagem mostrado na figura 4.12d.....	116
Figura 4.15 – Exemplo do processo de revisão funcional.....	118
Figura 4.16 – Acoplamento da seqüência operacional com o sistema produto, correspondente ao exemplo mostrado na figura 4.15.....	119
Figura 4.17 – Modelo representando o resultado do projeto conceitual.....	120
Figura 5.1 Modelo genérico de um SMMA.....	123
Figura 5.2 – Configuração de uma agência genérica.....	125
Figura 5.3 – Exemplos de configurações de agências e respectivos modelos em autômatos.....	126
Figura 5.4 – Modelo em autômato utilizado para representar as agências na atividade de descrição funcional.....	127
Figura 5.5 – Modelo em autômato utilizado na representação de agências similares, sem canais em comum.....	128
Figura 5.6 – Condensação de agência permanentemente habilitada.....	129
Figura 5.7 – Estrutura funcional formada por agências com junções e ramificações.....	130
Figura 5.8 – Estrutura funcional refinada a partir daquela apresentada na figura 5.7.....	131
Figura 5.9 Modelos de especificações correspondentes a um SMMA com transportador assíncrono.....	133
Figura 5.10 – SMMA genérico com transportador assíncrono e correspondentes modelos de especificações.....	134
Figura 5.11 – Modelo em rede C/A correspondente a um SMMA com transportador síncrono e autômato genérico das agências.....	135
Figura 5.12 – Modelos de especificações correspondentes a um SMMA com transportador síncrono.....	136
Figura 5.13 – Modelo genérico de um SMMA com transportador síncrono servindo diversas estações de trabalho.....	137
Figura 5.14 – Especificações genéricas para o sistema apresentado na figura 5.6.....	138
Figura 5.15 – Representação de um SMMA com transporte síncrono e um dos canais sem atividade.....	139
Figura 5.16 – Modelos de especificações do SMMA ilustrado na figura 5.15.....	140
Figura 5.17 – Especificações do SMMA ilustrado na figura 5.15 com inclusão de um gerador de sinal no canal sem atividade.....	141

Figura 5.18 – Modelo genérico para a configuração sem atividades em $n$ canais e especificações correspondentes.....	143
Figura 5.19 – Representação de um SMMA com mesmo mecanismo de fornecimento e retirada de peças, com sistema de transporte assíncrono.....	145
Figura 5.20 – Especificações para o SMMA ilustrado na figura 5.19.....	145
Figura 5.21 – Representação de um SMMA com mesmo mecanismo de fornecimento e retirada de peças, com sistema de transporte síncrono.....	146
Figura 5.22 – Especificações para o sistema ilustrado na figura 5.21.....	147
Figura 5.23 – Configurações estruturais relacionadas à junção de subsistemas.....	148
Figura 5.24 – Configurações relacionadas à junção de subsistemas, com atividade no canal de união.....	150
Figura 5.25 – Junção e ramificação de subsistemas numa agência.....	151
Figura 5.26 – Modelo da agência Agn mostrada na figura 5.25a.....	152
Figura 5.27 – (a) Especificação do canal Cn1 (figura 5.25a); (b) Máxima linguagem controlável correspondente.....	153
Figura 5.28 – (a) Partições selecionadas; (b) Modelo resultante da agregação dos estados.....	153
Figura 5.29 – (a) Especificação genérica; (b) Máxima linguagem controlável correspondente e as partições obtidas; (c) Modelo agregado.....	154
Figura 5.30 – Exemplos de SMMAs com sistemas de medição (FESTO, 2000a).....	155
Figura 5.31 – Descrição funcional de um SMMA com sistema de medição: (a) Rede C/A correspondente; (b) Modelos das agências; (c) Especificações para os canais.....	157
Figura 5.32 – (a) Estrutura funcional com especificações genéricas correspondentes; (b) Máxima linguagem controlável e agregação de estados; (c) Autômato agregado $\pi$ .....	159
Figura 5.33 – (a) Estrutura funcional com especificações genéricas correspondentes; (b) Autômato agregado $\pi$ .....	160
Figura 5.34 – (a) Estrutura funcional com especificações genéricas correspondentes; (b) Autômato agregado $\pi$ .....	161
Figura 6.1 – Produto a ser processado e montado no SMMA em projeto.....	165
Figura 6.2 – Estrutura funcional global do SMMA em projeto.....	166
Figura 6.3- Primeira estrutura funcional obtida a partir do processo de refinamento da estrutura global mostrada na figura 6.2.....	168
Figura 6.4 – Primeira estrutura funcional obtida a partir do refinamento da agência global mostrada na figura 6.2.....	169
Figura 6.5 – Segunda estrutura funcional obtida a partir do refinamento da estrutura apresentada na figura 6.3.....	170

Figura 6.6 – Segunda estrutura funcional obtida a partir do refinamento da estrutura apresentada na figura 6.4.....	171
Figura 6.7 - Primeira variante da estrutura funcional apresentada na figura 6.5.....	173
Figura 6.8 – Segunda variante da estrutura funcional apresentada na figura 6.5.....	174
Figura 6.9 – Terceira variante da estrutura funcional apresentada na figura 6.5.....	175
Figura 6.10 – Primeira variante da estrutura funcional mostrada na figura 6.6.....	176
Figura 6.11 – Segunda variante da estrutura funcional mostrada na figura 6.6.....	177
Figura 6.12 – Estrutura funcional selecionada, englobando as atividades de classificação, furação, teste e medição das peças.....	180
Figura 6.13 – Modelos das agências e das especificações operacionais relacionadas a estrutura funcional apresentada na figura 6.12.....	181
Figura 6.14 –Estrutura funcional selecionada, englobando as atividades de montagem, depósito, abertura e fechamento da embalagem e armazenamento.....	182
Figura 6.15 – Modelos das agências e das especificações operacionais relacionadas a estrutura funcional da figura 6.14.....	183
Figura 6.16 – Princípios de solução para as agências Ag1 (atuador pneumático linear) e Ag2 (atuador pneumático rotativo).....	185
Figura 6.17 – Princípios de solução para as agências Ag3 (sensores indutivo, capacitivo e óptico), Ag4 (atuador pneumático linear), Ag5 (atuador pneumático linear sem haste), Ag6 (sensor analógico de deslocamento), Ag7 (atuador pneumático linear) e Ag8 (esteira acionada por motor elétrico).....	186
Figura 6.18 – Princípios de solução para as agências Ag9 (mesa giratória acionada por motor elétrico), Ag10 (furadeira acionada por motor pneumático com avanço através de atuador pneumático linear) e Ag11 (atuador pneumático linear com haste de contato para verificação de furo).....	187
Figura 6.19 – Princípios de solução para a agência Ag12 (manipulador de três eixos).....	188
Figura 6.20 – Seqüências operacionais das agências Ag1 e Ag2 mostradas na figura 6.16.....	189
Figura 6.21 – Acoplamento da seqüência operacional Ag1 ao correspondente sistema produto Ag1.....	191

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Relação entre funções de transformação e funções propostas.....	44
Tabela 5.1 Informações gerais sobre o PCS, a síntese e a modularidade.....	135
Tabela 5.2 – Informações gerais sobre o Problema de Controle Supervisório (PCS), a síntese e a modularidade correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.6.....	138
Tabela 5.3 – Informações gerais sobre o PCS, a síntese e a modularidade correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.18.....	144
Tabela 5.4 – Informações gerais sobre o PCS, a síntese e a modularidade correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.21.....	147

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento tecnológico tem implicado num maior volume de problemas técnicos a serem resolvidos e na necessidade de interação entre diferentes áreas do conhecimento. Devido à diversidade de conhecimentos exigidos para a atividade de projeto de produtos e sistemas industriais, raramente são realizados por um único indivíduo o projeto e desenvolvimento de um novo produto. Com frequência, faz-se necessária a criação de uma equipe de trabalho de formação diversificada para realizar esta atividade.

De acordo com MAFFIN (1998), os modelos procedurais de projeto são tradicionalmente apresentados numa forma linear, ou seja, numa seqüência de fases bem definidas que por sua vez englobam diversas atividades. Entretanto, a mudança do cenário competitivo mundial, a complexa organização da sociedade moderna e a escassez de recursos têm causado uma nova postura das empresas frente à pressão de mercado atual. MAFFIN (1998) inclui a demanda por melhoria do produto, alta qualidade, custo reduzido e curto tempo entre o projeto e o lançamento do produto como preocupações relevantes das empresas. Nessas circunstâncias, ressalta o autor, diversos autores têm tratado a atividade de projeto cada vez mais de forma concorrente e como um processo multidisciplinar.

De acordo com DUFFY e ANDREASEN (1993) *apud* FERREIRA (1997), na década de 80 difundiu-se a constatação generalizada de que 80% do custo de um produto era determinado pelo seu projeto, embora o custo da atividade de projeto em si contribuísse com apenas algo em torno de 10% do custo por produto. De acordo com ULLMAN (1992), aproximadamente 85% dos problemas com novos produtos podem ser atribuídos a um projeto deficiente. DUFFY e ANDREASEN (1993) *apud* FERREIRA (1997) descrevem algumas iniciativas adotadas pelas empresas na busca pela competitividade:

“... No início dos anos 80, a automação de chão de fábrica era a questão central. ... O foco estava no aumento da eficiência e da flexibilidade da produção através da automação e da integração. Obtendo sucesso parcial a atenção mudou de direção.

Em meados dos anos 80, a indústria ocidental percebeu seus padrões de qualidade inferiores em relação à indústria japonesa. Uma intensa campanha pela qualidade foi deflagrada e posteriormente reforçada pelo lançamento da ISO 9000.

No final dos anos 80, a logística era a questão chave. A crescente complexidade no controle e planejamento da produção trouxe a logística a foco. Modernos conceitos de controle e planejamento, tais como MRP II (*Manufacturing Resource Planning II*), JIT (*Just In Time*) e OPT (*Optimal Planning Techniques*) foram introduzidos.

Os anos 90 foram dominados pela atenção no processo de projeto: engenharia simultânea, Design-For\_Almost-Everything, Knowledge based engineering são hoje termos em uso corrente. ...”

A atenção voltada ao processo de projeto continua em evidência em diversas áreas. Pode-se citar como exemplos o projeto mecatrônico (BUUR, 1990) (SHAKERI, 1998) (DE NEGRI, 1996), aplicável a sistemas caracterizados por uma forte integração da mecânica, eletrônica e informática e alguns trabalhos de pesquisa desenvolvidos no NeDIP (UFSC) – Núcleo de Desenvolvimento Integrado do Produto da Universidade Federal de Santa Catarina – que tratam do entendimento, desenvolvimento e otimização dos diversos aspectos ligados ao processo de projeto (FONSECA, 1996) (FERREIRA, 1997) (BACK e FORCELLINI, 1999).

Diante de todo este movimento em direção ao desenvolvimento de procedimentos adequados de projeto, destaca-se a busca de modelos que tratem os sistemas automatizados. Para tais sistemas, é imprescindível a utilização de um procedimento sistemático capaz de integrar e otimizar os diferentes aspectos envolvidos no projeto, adequando-se às várias tecnologias existentes e possibilitando a interação entre o pessoal envolvido, de modo a tornar o processo lógico e compreensível.

Especificamente no contexto de sistemas de manufatura, BONFE et al. (2002) ressaltam que o projeto de tais sistemas inclui diferentes modelos de representação ou de descrição. De fato, tal projeto envolve tarefas complexas no campo da engenharia mecânica e da eletrônica, em sistemas de controle e também na ciência da computação. Dessa forma, um sistema de manufatura é considerado como um sistema mecatrônico, o que significa que uma metodologia de projeto eficiente deverá considerar todos os aspectos relacionados ao sistema em projeto, especialmente aqueles relacionados à integração entre as partes físicas e de controle.

Entretanto, conforme apontam BONFE et al. (2002), na indústria de manufatura esta idéia integrada de projeto não é seguida, sendo o início da concepção do sistema de controle realizado durante a fase final do projeto físico, sendo este desenvolvimento agravado por restrições de tempo em função das especificações de engenheiros mecânicos envolvidos no projeto e o usuário final do sistema de manufatura projetado. Além desta situação, pode-se verificar que as especificações comportamentais (voltadas ao sistema de controle) são geralmente expressas informalmente, através de descrições textuais ou mesmo verbais. Este procedimento conduz à ineficiência no desenvolvimento do sistema de controle, em especial nos procedimentos posteriores de teste e manutenção que não estarão suportados por uma documentação de projeto rigorosa e não ambígua (BONFE et al., 2002).

Também este fato é apontado por DE NEGRI (1997), que relata que o projeto de sistemas automáticos tem sido conduzido tradicionalmente de acordo com as orientações dadas pelos fabricantes de hardware e de aplicativos computacionais, pressupondo que o processo físico já esteja projetado ou implementado. Pode-se justificar em parte tal procedimento observando-se que o ensino na engenharia mecânica como nas engenharias elétrica, de computação ou mecatrônica (controle e automação) ocorre de modo fragmentado.

De fato, à medida que aumenta a complexidade de sistemas de manufatura, seja pelas dimensões, pelo número de tecnologias envolvidas ou pelo desempenho exigido, a equipe de projeto poderá envolver especialistas em informática, controladores programáveis, hidráulica e pneumática, instrumentação, eletrônica, dentre muitas outras, onde cada um destes empregará conceitos, diagramas e terminologias próprias. Conseqüentemente, introduz-se problemas de organização e comunicação, visto a dificuldade de se obter uma representação global e um entendimento claro por todos os membros da equipe de projeto.

Segundo SHAKERI (1998), a multidisciplinaridade em sistemas torna o processo de projeto complexo e demanda a cooperação entre diversos engenheiros e especialistas. Cada um destes tende a observar o problema de acordo com o seu ponto de vista, surgindo então diferenças de visões e linguagens que por sua vez conduzem à incompreensão e à falta de comunicação entre os membros da equipe e, como conseqüências, tem-se o aumento do tempo de finalização do produto e a elevação de recursos utilizados (humanos, físicos e econômicos).

Diante deste quadro, salienta-se a necessidade e a importância de buscar uma otimização do processo de projeto dos sistemas tratados no presente trabalho, os denominados Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizados (SMMA). De maneira geral, o projeto de produto ou de sistemas técnicos compreende quatro fases: o projeto informacional, o projeto conceitual, o projeto preliminar e o projeto detalhado. Por sua vez, o projeto conceitual é visto como a fase mais importante do processo de projeto, uma vez que é aqui que as especificações de projeto caminham para uma concepção de solução. Assim, este trabalho busca um modelo adequado para o projeto conceitual de SMMA.

Um requisito fundamental para tal objetivo é o conhecimento de todos os modelos e atividades envolvidas ao longo do processo de projeto conceitual de SMMA. Nesse sentido, o presente trabalho objetiva a organização das atividades envolvidas nesta fase do projeto, de forma que o modelo proposto contemple os requisitos citados anteriormente, principalmente no que diz respeito aos seguintes aspectos:

- Integração dos projetos conceituais do sistema físico e de controle;
- Projeto conceitual em torno de um modelo de descrição funcional do sistema em projeto;
- Modelo funcional de fácil entendimento para pessoas de diferentes áreas;
- Adequação do projeto conceitual tradicional aos sistemas aqui tratados (SMMA).

O conceito de desenvolvimento do projeto de forma integrada, no presente trabalho, diz respeito à execução simultânea dos projetos relacionados à parte física e à parte de controle. Dessa forma, duas áreas foram estudadas no intuito de alcançar um modelo de projeto integrado:

#### 1. Projeto de Produtos ou Sistemas

Desde o início dos anos 60 vêm-se desenvolvendo modelos para o processo de projeto que orientem o projetista em sua atividade. O desenvolvimento do projeto pode ser entendido através

dos modelos procedurais constituídos de fases, tais como apresentados por diversos autores ou mais formalmente na VDI 2221 (1987). Conforme é visto no capítulo 2, os modelos convergem para um modelo de processo que compreende quatro fases: o projeto informacional, o projeto conceitual, o projeto preliminar e o projeto detalhado. O presente trabalho de pesquisa foca no projeto conceitual, por ser a fase mais importante do projeto (PAHL e BEITZ, 1989).

## 2. Modelagem e Controle de Sistemas a Eventos Discretos :

Um Sistema a Eventos Discretos (SEDs) é definido como um sistema dinâmico a estado discreto que evolui conforme a ocorrência assíncrona de eventos. As características principais dos SEDs são: o espaço de estados é discreto; o mecanismo de transição de estados é dirigido por eventos. Estas propriedades contrastam com os sistemas a variáveis contínuas, que se caracterizam pela continuidade das variáveis de estado e cujo mecanismo de transição é dirigido pelo tempo. Nesses últimos podem ser usados modelos de equações diferenciais, e o tempo é uma variável independente natural (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999).

A modelagem e controle de SEDs é uma área de pesquisa de grande interesse atual, estimulada pela diversidade de aplicações, como é o caso de sistemas de manufatura. Os sistemas aqui tratados, os SMMA, são também conceituados como sistemas a eventos discretos. É através da utilização de modelos que tratam o problema de controle e modelagem de SEDs que obtêm-se os controladores para a parte física do sistema.

A partir do estudo destas duas áreas, busca-se um procedimento de projeto conceitual que contempla as duas partes do sistema automatizado a ser construído: a parte física e de controle. Para tanto, a teoria de modelagem e controle de SEDs é inserida no processo de projeto como ferramenta fundamental de obtenção de uma concepção para o controle, enquanto a utilização de um modelo adequado de descrição funcional auxilia o projetista a conceber a parte física de forma mais sistemática.

### **1.1 Considerações sobre as abordagens tradicionais de projeto conceitual**

Conforme apontado por DE NEGRI (1996), para a realização do projeto de sistemas automatizados não basta empregar as atividades, meios e modelos da engenharia de automação para as partes de controle e da engenharia de produto para a parte física. Também se faz necessário integrar as diferentes áreas, principalmente na fase de concepção do sistema em que se decide quais as tecnologias que serão empregadas.

Para ilustrar a importância do assunto levantado no parágrafo anterior, a figura 1.1 (FESTO, 2000b) apresenta o ciclo de vida de um sistema automatizado onde as diversas atividades são relacionadas ao tempo de execução. Essa figura representa, de forma qualitativa, o esforço

demandado pela empresa para a completa operação do sistema projetado. Nota-se claramente que grande esforço é realizado na busca, detecção e reparos de erros e na otimização do sistema automatizado. De uma forma ideal, grande atenção deveria ser dada às atividades de planejamento e projeto de tais sistemas, pois são estas fases, se bem sistematizadas e executadas, que determinarão o volume de trabalho nas fases subseqüentes.

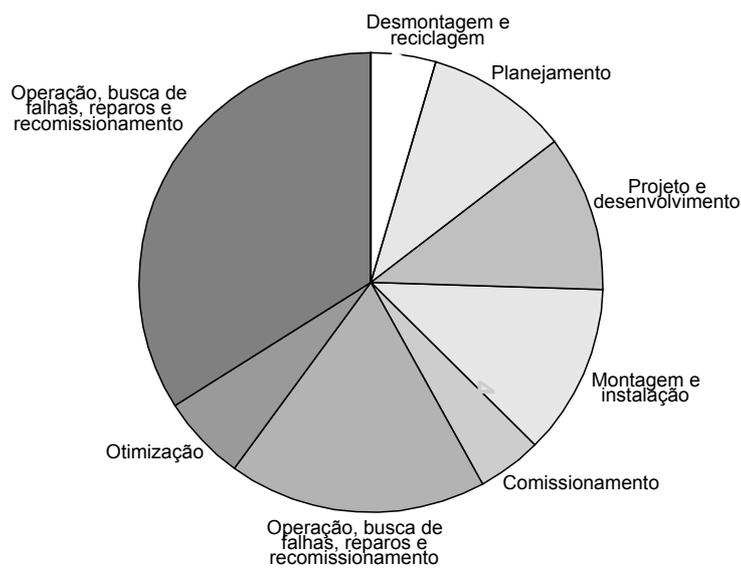


Figura 1.1 – Esforço das atividades durante o ciclo de vida de sistemas automatizados (FESTO, 2000b).

Reforçando o aspecto mostrado na figura 1.1, MORAES e CASTRUCCI (2001) afirmam que historicamente até 90% do esforço total de programação são dedicados à solução de problemas posteriores à instalação, à correção de falhas ou erros de funcionamento. Dessa forma, é extremamente importante inserir novos métodos, técnicas e ferramentas nas metodologias de projeto existentes, visando diminuir a perda de tempo e recursos ocasionados por reparos e otimizações.

A tarefa de projetar sistemas automatizados seria relativamente simples se metodologias de projeto de cada um dos sistemas (físico e controle) pudessem ser reunidas e aplicadas diretamente. No entanto esta tentativa não funciona e, ao contrário, traz maiores dificuldades que auxílio (DE NEGRI e PAES, 2003). Portanto, é necessário desenvolver uma metodologia que integre estes sistemas e não suas metodologias particulares. Adicionalmente, é imprescindível que esta sinergia ocorra principalmente nas fases iniciais e se desenvolva naturalmente ao longo do projeto.

Atualmente os projetos de sistemas automatizados são realizados contando, principalmente, com a heurística dos profissionais envolvidos. Sendo assim, o que mais importa é a experiência em projetos anteriores e o embasamento da empresa que vai executá-los. É comum o engenheiro

experiente visitar e conhecer o processo a ser automatizado, receber os requisitos da contratante, fazer algumas anotações para em seguida voltar ao escritório e começar a projetar. O próximo passo seria separar o que corresponde às partes física e de controle, convidar as equipes para atribuir as respectivas responsabilidades e estipular prazos (DE NEGRI e PAES, 2003).

A interação para troca de informação entre os membros dá-se separadamente e normalmente aos pares, de forma que profissionais da mecânica dialogam com os da elétrica, sem a presença de um membro da informática, embora as implicações de decisões tomadas pelos dois primeiros possam afetar o trabalho do terceiro e, assim sucessivamente. Isto ocorre em parte porque as linguagens destes profissionais são distintas, onde uns não conseguem entender as dificuldades e limitações dos outros (DE NEGRI e PAES, 2003).

Observa-se que, mesmo considerando que algumas abordagens estabelecem os processos de projeto físico e de controle como concomitantes, na verdade a sua realização é ainda feita de forma sequencial. Sob o ponto de vista de especialistas em automação é algo natural, pois na elaboração de um sistema de controle é necessário inicialmente obter-se o modelo de uma planta física (mesmo que esta planta esteja ainda na forma de documentos do produto) para em seguida adotarem-se procedimentos de síntese. Por outro lado, no projeto mecânico da planta, os especialistas observam inicialmente aspectos funcionais, configurações espaciais etc, sem uma preocupação com aspectos voltados a automatização (etapas iniciais), considerando assim que a automação e controle são atividades eminentemente realizadas após o projeto do sistema físico (ou pelo menos a uma concepção deste). Desta forma, é natural que ambos especialistas enxerguem a fase de automatização realizada *a posteriori* do projeto físico.

Para realizar um adequado projeto conceitual de sistemas automatizados e minimizar os problemas citados, um dos requisitos fundamentais é estabelecer uma sistemática que conduza o grupo através de diagramas compreensíveis a todos durante a maior parte do tempo de desenvolvimento. Nesse sentido, além da necessidade de busca por modelos que traduzam estes requisitos, o entendimento da atividade de descrição funcional (etapa do projeto conceitual) (PAHL e BEITZ, 1989) é de extrema importância, visto que é nesta etapa que os modelos funcionais são utilizados, seja no projeto do sistema físico como no de controle. Dessa forma, o próximo capítulo faz uma discussão sobre as diversas abordagens encontradas na literatura relacionadas à descrição funcional, ressaltando os problemas a serem solucionados de forma a assegurar a aplicação da técnica aos sistemas tratados no presente trabalho.

## **1.2 Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizados (SMMAs)**

Os sistemas de manufatura considerados neste trabalho são utilizados para a produção de peças que requerem múltiplas operações de processamento e/ou montagem. Cada uma destas operações é

realizada em uma estação, e esta é fisicamente interligada a outra estação através de um sistema de transporte de peças, denominado sistema de movimentação. Outros termos para o mesmo sistema são encontrados na literatura: linhas de transferência e sistemas de manufatura automatizados similares (GROOVER, 2001), linhas de montagem automatizadas (GROOVER, 2001), sistemas de fluxo de material (ASKIN e STANDRIDGE, 1993) (FESTO, 2000b).

Entende-se ser mais adequado, para o contexto dos sistemas aqui tratados, utilizar as seguintes terminologias de forma hierárquica: ‘Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizados’ como uma classe de ‘Sistemas de Fluxo de Materias’ que por sua vez é uma classe de ‘Sistemas de Manufatura’. O termo ‘Sistema de Manipulação e Montagem Automatizados’ é originário da norma VDI 2860 (1990) (Montagem e Manipulação; Funções de Manipulação, Unidades de manipulação; Terminologia, definições e símbolos).

De acordo com a VDI 2860, a manipulação é uma operação comum em sistemas de fluxo de material e é definida da seguinte forma: “manipulação é a mudança de uma configuração espacial de corpos definidos geometricamente dentro de um sistema de coordenadas de referência definida. Condições adicionais – como tempo, quantidade e caminho – podem ser definidas.” Dessa forma, o termo manipulação refere-se a todas as seqüências de movimentos usadas para iniciar ou finalizar os processos e/ou montagens e também a armazenagem. Embora o termo utilizado (SMMA) para definir os sistemas aqui tratados não inclua a palavra ‘processos’, entende-se que o sistema de manipulação interliga diversas estações de trabalho que podem também executar processos de modificação de forma e superfície (usinagem), colagem, soldagem, dentre outros.

A figura 1.2 a seguir ilustra uma configuração típica dos sistemas tratados no presente trabalho. A linha de processamento automatizado consiste de múltiplas estações de trabalho que estão interligadas por um sistema de manipulação também automatizado. Eventualmente algumas estações de trabalho ou mesmo alguns módulos do sistema de manipulação poderão ser manuais ou semi-automatizados, em decorrência da complexidade ou custo da automação. De qualquer forma, cada estação executa uma operação determinada, de forma que o conjunto de tais operações é necessário para completar uma peça acabada. Também, múltiplas peças são processadas simultaneamente na linha, cada uma em uma estação de trabalho. Numa configuração mais simples, o número de peças no sistema em qualquer momento é igual ao número de estações.

A figura 1.3 apresenta uma configuração típica de um sistema de montagem automatizado, onde é executada uma seqüência de operações de forma a combinar múltiplos componentes numa entidade única. Esta entidade poderá ser um produto final ou uma sub-montagem de um produto maior. Geralmente as partes são montadas uma a cada vez de tal forma que a montagem ocorre de forma progressiva. Em sistemas com múltiplas estações de trabalho, a manipulação é executada de tal forma a transferir as partes parcialmente montadas entre as estações (GROOVER, 2001).

O presente trabalho tratará daqueles sistemas onde tanto as estações de trabalho como os sistemas de manipulação são completamente automatizados, além de considerar que em determinadas situações é possível se ter um número de peças circulando no sistema maior que o número de estações de trabalho que o compõem.

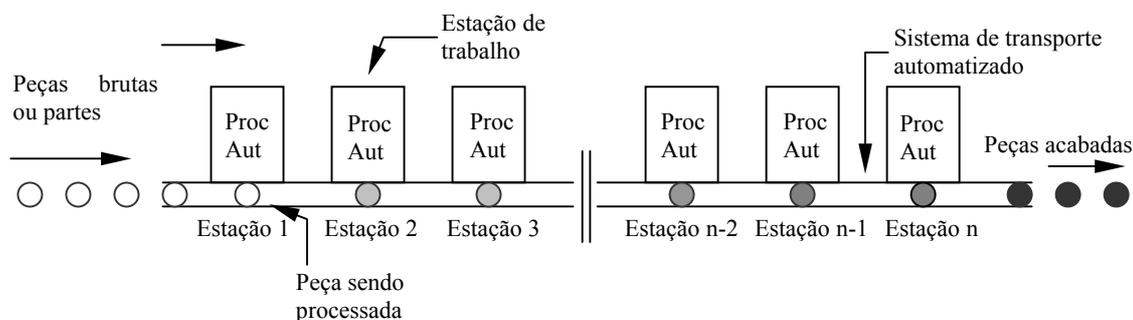


Figura 1.2 – Configuração geral de linhas de produção automatizadas (GROOVER, 2001).

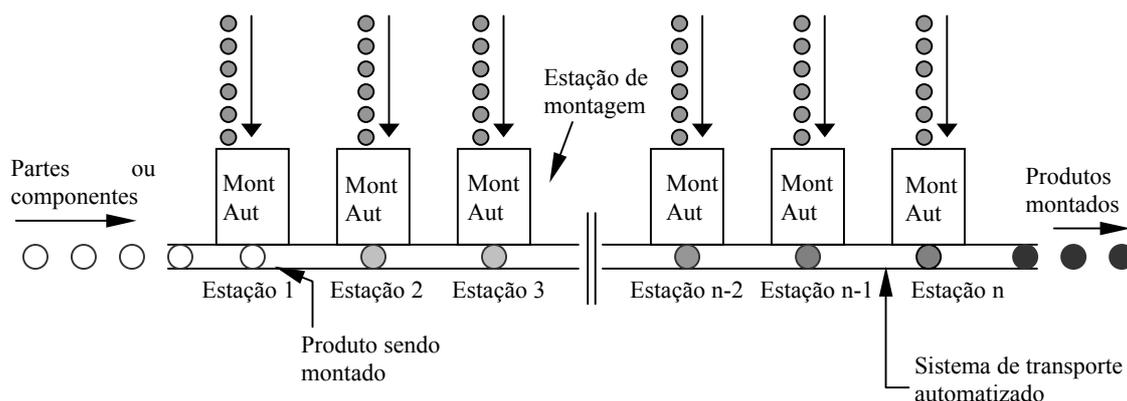


Figura 1.3 – Configuração geral de sistemas de montagem automatizados (GROOVER, 2001).

A partir das figuras 1.2 e 1.3 pode-se observar a similaridade que existe entre as configurações típicas de linhas de processamento automatizadas e linhas de montagem automatizadas. Será visto no decorrer do trabalho que o processo de projeto conceitual para os dois tipos de sistemas é o mesmo, em virtude da similaridade estrutural e da similaridade das especificações. No presente trabalho são considerados os sistemas que englobam as duas configurações, ou seja, tanto processam peças como realizam a montagem automatizada de partes, sendo desta maneira formadas por estações de trabalho (processamento ou montagem) interligadas por um sistema de manipulação automatizado.

### 1.3 Organização do trabalho

Esta tese é estruturada da seguinte forma: o capítulo 2 introduz de forma sintética as metodologias de projeto existentes relacionadas ao projeto conceitual físico e de controle, apresentando os principais modelos utilizados. Segue com a análise de uma das principais atividades do projeto conceitual (PAHL e BEITZ, 1989), a descrição funcional, que tem papel importante como modelo central no projeto integrado proposto. Em função do estudo das diversas abordagens que tratam da modelagem funcional, um modelo é proposto para prover o sistema em projeto de três perspectivas: funcional, estrutural e comportamental. As duas primeiras perspectivas são alcançadas através da utilização da rede Canal Agência (DE NEGRI, 1996), enquanto a terceira através de modelos de sistemas a eventos discretos.

O capítulo 3 apresenta a teoria de modelagem e controle de SEDs proposta por RAMADGE e WONHAM (1989) que, diferentemente de outras abordagens, inclui procedimentos de síntese de controladores. Em seguida, uma extensão desta teoria, o controle modular local proposto por QUEIROZ e CURY (2000), é apresentada de forma a complementar a descrição funcional com a perspectiva comportamental.

A partir dos fundamentos expostos e discutidos nos capítulos 2 e 3, é apresentado no capítulo 4 um modelo procedural do projeto conceitual proposto para SMMA. O capítulo 4 descreve sucintamente todas as atividades, métodos e ferramentas utilizadas durante a atividade de projeto, ressaltando a utilização da nova descrição funcional para um SMMA. Como atividade fundamental do novo processo de projeto conceitual proposto, a descrição funcional é detalhada em relação a integração dos aspectos voltados ao projeto físico com o projeto de controle. Por fim o capítulo mostra o resultado (a concepção) do novo modelo proposto.

O capítulo 5 complementa o capítulo 4 no sentido de prover uma base de conhecimento de especificações operacionais aplicáveis aos sistemas tratados. Mostrar-se-á que tais especificações são dependentes da configuração do sistema em projeto, determinando certas restrições de funcionamento de forma que haja um correto fluxo de peças e/ou partes no sistema. A base de conhecimento obtida serve como um banco de dados a ser disponibilizado ao projetista de forma a automatizar a busca de modelos comportamentais para o sistema projetado.

O capítulo 6 apresenta um exemplo de aplicação da metodologia proposta, onde é tratado o projeto conceitual de um pequeno SMMA.

O capítulo 7 apresenta as principais conclusões do trabalho e as perspectivas futuras em relação aos problemas surgidos e às limitações da metodologia.

## **2. PROJETO CONCEITUAL DE SISTEMAS TÉCNICOS**

De acordo com diversos autores da área de projeto, para que o desenvolvimento de sistemas técnicos se torne eficaz, é necessário que o processo de projeto seja planejado cuidadosamente e executado sistematicamente. É imprescindível um modelo de projeto capaz de integrar e otimizar os diferentes aspectos envolvidos, se adequando às várias tecnologias e possibilitando a interação efetiva entre o pessoal de projeto (PAHL e BEITZ, 1989) (HUBKA e EDER, 1988). Nesse sentido, é fundamental o entendimento da estrutura do projeto conceitual quando aplicado a diversos tipos de sistemas técnicos, de forma a alcançar uma melhor abordagem a ser adotada no projeto de SMMA's.

Conforme mencionado no capítulo introdutório, o presente trabalho tem por objetivo contribuir para o projeto conceitual de SMMA's, de forma a alcançar um processo que economize tempo e recursos. Esta contribuição será alcançada através do desenvolvimento de uma abordagem integrada, onde o projeto conceitual do sistema físico e de controle se dê de forma concomitante. Para tal fim, este capítulo traz uma visão geral do projeto conceitual de sistemas, enfatizando a sua principal etapa: a descrição funcional. É a partir desta etapa que se desenvolverá o suporte para o projeto conceitual integrado, assunto a ser desenvolvido ao longo do presente trabalho.

Inicialmente apresentam-se as diversas metodologias de projeto existentes, de forma a contextualizar o projeto conceitual e promover uma visão global do processo. Em seguida, o projeto conceitual de sistemas técnicos é discutido, ressaltando sempre a etapa de descrição funcional. A partir daí o capítulo se concentra em abordar de forma criteriosa os diversos modelos de descrição funcional encontrados na literatura, para então apontar os problemas a serem solucionados e os requisitos impostos para uma descrição funcional adequada ao projeto conceitual de SMMA's. A partir dos fundamentos e da análise das diversas abordagens apresentadas neste capítulo, será proposto um novo um modelo de descrição funcional aplicado ao projeto de SMMA's.

### **2.1 Metodologias de projeto de produto e de sistemas técnicos**

Um grande número de modelos para o processo de projeto de engenharia tem sido proposto de forma a promover melhorias na compreensão e na prática desta atividade, além de satisfazer as necessidades de ensino, organização e automação do projeto. Contribuições importantes nesse sentido incluem FRENCH (1985), HUBKA E EDER (1988), PAHL e BEITZ (1989), PUGH (1991), ULLMANN (1992) e ANDREASEN (1993). O objetivo destes autores é promover um embasamento teórico de forma a encorajar a utilização de uma abordagem sistemática para a atividade de projeto de engenharia. Apesar do progressivo desenvolvimento destes modelos, existe um consenso que muitos destes exibem características básicas comuns.

Conforme evidenciado em FERREIRA (1997), os modelos existentes convergem para um modelo consensual compreendendo as fases de esclarecimento da tarefa (projeto informacional), projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Tais fases conduzem a certos resultados intermediários: especificação, estrutura funcional, leiaute preliminar, documentação detalhada, dentre outros. Os modelos apresentados podem assim ser considerados variantes do que se pode chamar de modelo consensual do processo de projeto, que contempla as quatro fases descritas no início deste parágrafo.

As similaridades apresentadas nestes modelos são confirmadas através das normas técnicas VDI 2221 (1987) e VDI 2222 (1973). Segundo DE NEGRI (1996), apoiado pelo trabalho de FIOD (1993), a análise detalhada das diferentes metodologias de projeto industrial destaca a forte representatividade do procedimento de projeto de sistemas técnicos recomendado pela VDI 2221 a qual reflete a escola alemã e praticamente confunde-se com a metodologia de projeto sistemático segundo PAHL e BEITZ (1989). Ainda, segundo DE NEGRI (1996), fica evidente, principalmente nas fases de projeto de configuração e projeto detalhado, que a metodologia de projeto de produtos industriais está voltada principalmente para o projeto de produtos mecânicos.

De maneira geral, a metodologia de projeto baseada na escola alemã corresponde a uma sistematização do processo de projeto, realizada em fases, em uma estrutura que tem início na expressão das necessidades a serem atendidas e termina com o conjunto de informações detalhadas que compõem uma solução para essas necessidades – propriamente, uma definição para o produto (MENDES, 2001).

BACK e FORCELLINI (1999) ressaltam que, devido à existência de inúmeras abordagens quanto à atividade de projeto, pode-se dizer que não se tem um modelo geral que possa ser usado em todo e qualquer tipo de projeto. Em outras palavras, não existe uma teoria de projeto que possa ser adequada à solução de todo tipo de problema. O que existe, até então, são procedimentos sistemáticos (metodologias) que, com maior ou menor grau de detalhamento, orientam as ações dos projetistas.

Este aspecto é evidenciado quando se observa o projeto de produtos e processos multitecnológicos ou mecatrônicos, integrando as áreas de mecânica, eletro-eletrônica e informática. Um grande número de trabalhos tem proposto as orientações gerais para a modelagem do processo de projeto mecatrônico (HILDRE, 1996 *apud* SHAKERI (1998)) (SHAKERI, 1998) (ISERMAN, 1996). A partir destes trabalhos observa-se que ainda não há uma proposta concreta para o modelo do processo de projeto mecatrônico sendo, na verdade, empregada uma subdivisão segundo as fases do processo de projeto de produtos industriais (segundo a escola alemã).

De todo modo, observa-se que as fases e passos recomendados são praticamente os mesmos para as diferentes metodologias, havendo diferenciação principalmente quanto aos meios, atividades e resultados obtidos (DE NEGRI, 1996). Assim, é correto afirmar que, apesar de não

haver uma metodologia global de projeto de produto ou sistema, as fases ou etapas das diversas metodologias se assemelham quanto a utilização do modelo procedural de quatro fases, este como apresentado na sistemática oriunda da escola alemã.

No contexto de sistemas automatizados, MIYAGI (1996) estabelece diretrizes para o projeto do sistema de controle, onde se pressupõe a parte física (ou objeto de controle) já concebida em forma de documentação detalhada das partes. A sistemática abrange toda a fase de concepção, desde a lista de necessidades até a execução de testes na planta real. Aqui também fica evidente que as etapas do processo de projeto são similares àquelas descritas na abordagem de projeto de produto segundo a escola alemã.

## 2.2 Fases do Projeto de Sistemas Técnicos

Conforme apresentado na seção 2.1, o processo de projeto de sistemas técnicos pode ser estruturado em um modelo consensual (FERREIRA, 1997), que por sua vez é sistematizado em fases denominadas *informacional*, *conceitual*, *preliminar* e *detalhado*. Cada fase é composta por um conjunto de tarefas que podem ser interpretadas como passos que o projetista deve seguir para cumprir cada fase do processo. Na figura 2.1 estão representadas todas as fases do processo de projeto, com o destaque da fase conceitual.

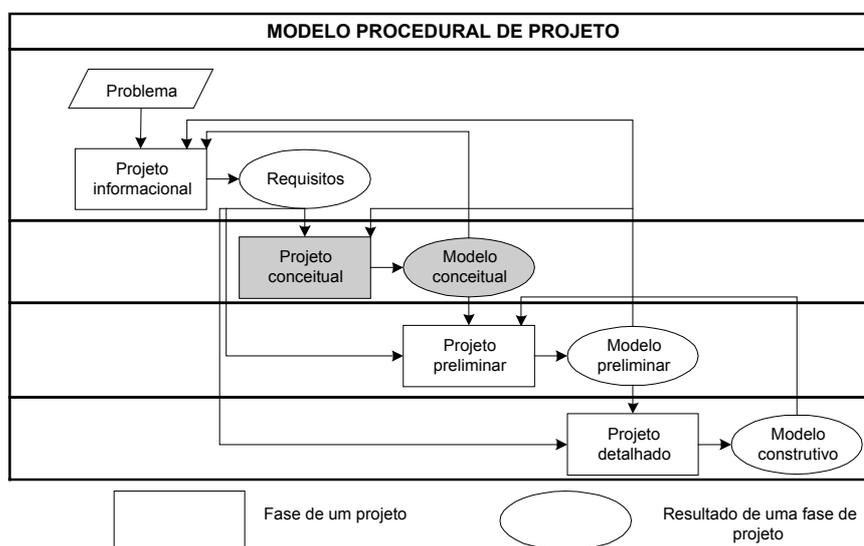


Figura 2.1 – Processo de projeto (adaptado de DE NEGRI, 1996).

Na fase de projeto informacional, o problema é analisado e informações sobre o mesmo são coletadas. Com base nestas informações, um conjunto de especificações de projeto é elaborado. As especificações definem as funções e as propriedades requeridas do sistema técnico bem como

possíveis restrições em relação a este ou mesmo ao processo de projeto, tal como normas e prazos. Em resumo, uma vez definido o problema e após sua análise durante a fase do projeto informacional, estabelece-se uma lista de requisitos de projeto.

Segundo FERREIRA (1997), a lista de especificações deflagra e guia o processo de projeto, além de servir de parâmetro para a evolução do sistema técnico ao longo do seu projeto. Esta lista é vista como a principal entrada do processo de projeto conceitual, sendo a inclusão de dados realizada de forma dinâmica. Após a realização do projeto deve ter evoluído de modo a representar as características do produto final. Ao final, o sistema projetado deve estar em sintonia com a lista de especificações, ainda que esta tenha se modificado no decorrer do processo de projeto.

O projeto conceitual, que segue após o levantamento dos requisitos de projeto na fase informacional, busca identificar um ou mais princípios de solução (configurações estruturais e funcionais) que atendam aos objetivos especificados. Segundo PAHL e BEITZ (1989), o projeto conceitual “é a parte do processo de projeto no qual, pela identificação dos problemas essenciais através da abstração, pelo estabelecimento da estrutura de funções e pela busca de princípios de solução e suas combinações, o caminho básico da solução é exposto através da elaboração de uma concepção de solução”.

De maneira geral, o projeto conceitual é a fase do processo de projeto que gera, a partir de uma necessidade detectada e esclarecida, uma concepção para um produto que atenda da melhor maneira possível esta necessidade, sujeita às limitações de recursos e às restrições de projeto (BACK e FORCELLINI, 1999). O projeto conceitual é visto como a mais importante fase do processo de projeto, pois decisões ali tomadas terão grande influência nas fases seguintes (PAHL e BEITZ, 1989). O projeto conceitual engloba duas principais subfases: a descrição funcional e a síntese de soluções. Modela-se o sistema primeiramente em termos funcionais e, em seguida, sintetizam-se princípios de soluções para cada uma das funções.

No início do projeto conceitual, o problema de projeto complexo, é decomposto sucessivamente em subproblemas de menor complexidade, até que se torne possível associar sub-soluções a tais subproblemas. Em seguida, o projetista compõe as sub-soluções (simples) em uma solução completa para o problema de projeto. Esta solução estará dessa forma num mesmo nível de complexidade em relação ao problema total, representando no entanto o sistema de uma forma mais concreta.

No início da atividade de descrição funcional, o problema de projeto é descrito em termos da função principal, ou funções principais do produto. Tal função deve ser detectada analisando-se os requisitos funcionais presentes na especificação de projeto. A função total representará desta forma o problema de projeto, caracterizado por uma maior complexidade neste momento, que será desdobrado em subfunções ou subproblemas de menor complexidade, para as quais buscar-se-ão sub-soluções. O processo de descrição funcional segue até a identificação de princípios de solução

para cada uma das sub-funções da estrutura obtida. Em outras palavras, o modelo de estrutura de funções é convertido num modelo de concepção do produto ou sistema.

O projetista deve em seguida buscar meios que venham desempenhar cada uma das subfunções da estrutura de funções elaborada. Se possível, várias alternativas de meios para cada subfunção. Estes meios serão daqui por diante denominados “princípios de solução” (PAHL e BEITZ, 1989). De posse dos princípios de solução, estes são então combinados gerando uma ou mais soluções totais para o sistema caracterizando concepções para o produto. As concepções são por fim avaliadas com relação aos requisitos da especificação de projeto e a melhor dentre elas é escolhida.

A busca por princípios de solução é a etapa do projeto conceitual que exige as maiores demandas por parte do projetista. É um passo sobretudo criativo, ainda que se utilize com frequência de métodos discursivos, como o uso de catálogos de princípios de solução. É o grande passo dado do abstrato em direção ao concreto no projeto conceitual (FERREIRA, 1997). O processo de busca por princípios de solução é um tema que, pela sua amplitude e profundidade, não cabe no escopo desta tese. De qualquer forma, a busca por princípios de solução envolve, de acordo com a classificação proposta por PAHL e BEITZ (1989), métodos convencionais, intuitivos e discursivos.

O modelo de concepção é o último e principal modelo do sistema da fase de projeto conceitual (PAHL e BEITZ, 1989) (HUBKA e EDER, 1988). Representa o sistema sobretudo em linguagem gráfica, ou seja, em desenhos esquemáticos ou esboços e ao mesmo tempo suas propriedades se assemelham às propriedades pretendidas no sistema (FERREIRA, 1997). Suas funções principais são a descrição e a comunicação das idéias básicas que constituem a concepção elaborada. Ainda, tendo como base a abordagem de projeto segundo PAHL e BEITZ (1989), FERREIRA (1997) estabelece que os princípios de solução total devem ser desenvolvidos até chegar-se ao modelo de concepção pela definição das formas e arranjos dos seus elementos, das classes de materiais utilizados nos elementos e do dimensionamento preliminar (matemático ou intuitivo) dos principais elementos.

Em resumo, o processo de projeto conceitual pode ser subdividido em duas atividades: a descrição funcional e a síntese de soluções. Na primeira, o sistema é projetado em termos das funções que se espera que o mesmo venha a desempenhar, enquanto na segunda em função dos meios (princípios de solução) capazes de desempenhar tais funções. Por entender que é na atividade de descrição funcional que será alcançado um dos objetivos do trabalho, o projeto conceitual integrado (sistema físico e de controle), a presente tese enfatiza o estudo desta atividade no sentido de alcançar uma sistemática adequada para o tratamento dos sistemas aqui tratados (SMMAs).

### 2.3 Descrição Funcional na Atividade de Projeto

Há o consenso entre os pesquisadores da área de projeto de sistemas técnicos que a descrição funcional é fundamental no processo de projeto, consistindo-se no elo entre os requisitos impostos pelo usuário de determinado produto ou sistema e o processo de projeto deste. Por conseguinte, o entendimento das diversas abordagens que tratam da descrição funcional tem sido objeto de análise intensa no meio acadêmico.

UMEDA e TOMIYAMA (1997), ressaltando a importância do tema, afirmam que a atividade de projeto é um processo em que a representação do objeto de projeto que inclui funções é gradualmente refinada: tarefa denominada pelos autores evolução funcional (aqui será utilizado o termo '*refinamento funcional*' ou '*decomposição funcional*'). O projetista especifica os requisitos através de conceitos funcionais (a função representa a intenção do projetista) que por sua vez descrevem os objetos de projeto que podem satisfazer os requisitos. A descrição física do objeto de projeto deverá ser associada com a descrição funcional.

A descrição funcional é utilizada pelos projetistas para modelar o objeto de projeto num nível abstrato e, através dele, desenvolver um produto ou sistema sem restringir o conjunto de soluções possíveis. Na literatura, diferentes formas de descrição funcional são propostas e analisadas e também procedimentos que descrevem como uma estrutura funcional pode ser derivada a partir de um produto existente (análise funcional).

Apesar da evidente importância desta atividade no contexto de projeto de engenharia, muitos problemas ainda são atualmente relatados em relação à utilização e compreensão desta técnica. Segundo PULM e LINDEMAN (2001), a ausência de uma sistemática padrão contrapondo-se com o grande número de métodos de projeto em geral, aumentam as dificuldades de aplicação da descrição funcional a determinados sistemas.

De acordo com KEUNEKE (1991), embora muitos pesquisadores tenham se esforçado em determinar modelos que representem adequadamente a descrição funcional de um sistema em projeto, atualmente não existe ainda uma concordância sobre quais informações essenciais estes modelos devem incluir. Ainda, PULM e LINDEMAN (2001) afirmam que existem atualmente muitos modelos distintos que tratam do assunto e ainda não está claro qual modelo melhor se adequa a determinado problema ou se existe um melhor modelo comparado aos demais. Outra falha na descrição funcional, apontada por SVENDSEN e HANSEN (1993), é que o processo de decomposição é realizado de forma empírica, baseado na experiência do projetista, geralmente em sistemas simples, sendo portanto desprezada a explicação dos métodos ou leis em que esse processo é realizado.

Nesse contexto, nota-se um grande esforço no sentido de entender e utilizar de forma adequada a técnica de descrição funcional. Os recentes trabalhos de ZHANG et al. (2001), PULM e

LINDEMAN (2001), BRACEWEEL e WALLACE (2001), STTETER et al. (2001) e HUBKA e EDER (2001), demonstram a importância do tema e a discussão sobre o real significado da descrição funcional, caracterizando uma área de pesquisa específica dentro da área de projeto de engenharia. Ressalta-se também que, segundo tais trabalhos, é a partir do estudo deste tema que torna-se possível o desenvolvimento de ferramentas computacionais de apoio ao projeto conceitual de produtos e sistemas.

Dessa forma, as seções seguintes exploram modelos de descrição funcional de acordo com a área de aplicação, apresentando as principais características e as restrições na sua utilização.

### **2.3.1 Descrição funcional segundo a escola alemã de projeto**

A escola alemã de projeto, representada principalmente pelo trabalho de PAHL e BEITZ (1996), considera que a análise de sistemas técnicos – seja este uma planta, um equipamento ou um componente – envolvem processos técnicos em que energia, matéria e informação são canalizadas ou convertidas. Por exemplo, dentro de um processo técnico, a transformação de energia e informação afeta as propriedades básicas da matéria, como estrutura, forma, dimensão, localização, etc. Ainda, diferentes tipos de energia num processo técnico podem ser convertidos em outros tipos, ou então seus parâmetros modificados, ou ainda ambos os tipos de mudança podem ocorrer. A transformação da informação refere-se à forma, qualidade, quantidade e localização da informação dentro de portadores de informação.

Dessa forma, a escola alemã constrói a descrição funcional baseada em funções que convertem ou canalizam matéria, energia ou informação. Por sua vez, a função de um sistema técnico é determinada pelos requisitos de projeto. A análise e abstração dos requisitos permitem assim que se identifique uma função com os fluxos de energia, matéria e informação. Assim, o conceito de função está intimamente ligado à conversão ou a canalização destes fluxos.

PAHL e BEITZ (1989) definem função como a relação entre entradas e saídas de um sistema cuja proposta é executar uma tarefa. BACK (1983), semelhantemente, afirma que uma função é a relação entre causas e efeitos das grandezas de entrada e saída de um sistema. Segundo FERREIRA (1997), tais autores representam uma primeira tendência que busca relacionar o conceito de função a entradas e saídas (numa relação causal) de um sistema físico. O conceito de função no âmbito desta abordagem está intimamente ligado ao conceito de função matemática. Aqui, uma função é a relação de uma magnitude  $x$  com uma magnitude  $y$  de forma que um único valor de  $y$  é atribuído para cada valor de  $x$ .

A descrição funcional de acordo com o conceito de função acima descrito é utilizada nas metodologias de projeto segundo a escola alemã. De acordo com PAHL e BEITZ (1989), a lista de requisitos elaborada no projeto informacional determina a função do produto ou sistema, que é a

relação entre as entradas e saídas de uma planta, máquina ou componente. Uma vez que o problema essencial foi identificado, é possível indicar uma função total que, baseada nos fluxos de energia, matéria e informação, podem, com o uso de diagramas de blocos, expressar as relações entre entradas e saídas independentemente da solução (BACK, 1983).

A função total pode muitas vezes ser dividida diretamente em sub-funções correspondentes a sub-tarefas. As relações entre sub-funções e a função total é muitas vezes governada por certas restrições, visto que algumas sub-funções têm que ser satisfeitas antes de outras. A combinação de sub-funções individuais resulta na denominada estrutura funcional representando a função total. O projetista deve em seguida buscar meios que venham a desempenhar cada uma das sub-funções da estrutura elaborada. Tais meios conterão atributos de forma e material capazes de realizar efeitos físicos, químicos ou biológicos – sobretudo efeitos físicos na engenharia mecânica – que desempenharão as funções desejadas (estes meios serão daqui por diante denominados “princípios de solução”). A figura 2.2 a seguir representa o processo de descrição funcional segundo a escola alemã.

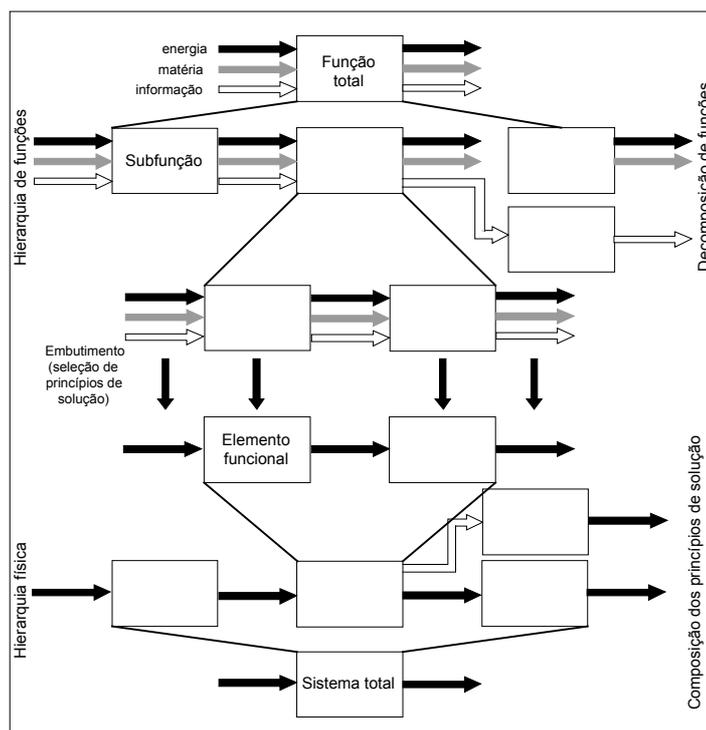


Figura 2.2 – Descrição funcional orientada ao fluxo de energia, matéria e informação segundo a escola alemã de projeto de produto.

Uma estrutura de funções então é normalmente obtida pela decomposição da função total em funções de menor complexidade. Este processo de refinamento sucessivo deve culminar na

elaboração de um modelo de estrutura de funções de baixa complexidade interligadas por fluxos de energia, matéria e informação. Pode-se chegar a uma “estrutura de funções parciais”, a uma “estrutura de funções elementares” ou ainda a uma “estrutura de operações básicas”.

De qualquer forma, ULLMANN (1992) recomenda que se desdobre a estrutura de funções até a estrutura de funções elementares, que por definição não poderá mais ser desdobrada. Segundo FERREIRA (1997), as estruturas de funções elaboradas entre o modelo de função total e o modelo de estrutura de funções elementares são denominadas estruturas de funções parciais. A estrutura de funções básicas se distingue da estrutura de funções elementares somente pela omissão da definição das entradas e saídas. Isto quer dizer que na estrutura de operações básicas só são definidas as operações ou ações e não o que será transformado.

A descrição funcional utilizando uma estrutura de operações básicas é uma técnica bastante usual da escola de projeto alemã. Pode-se citar as operações básicas propostas por RODENACKER (1991), ROTH (1982), KRUMHAUER (1974), KOLLER (1985) e PAHL e BEITZ (1989). Segundo estes últimos, embora inexista uma convergência quanto à identificação e à representação das operações básicas, pode-se perceber uma equivalência de diversos autores para tais bases.

De acordo com FERREIRA (1997), uma das grandes vantagens em se trabalhar com operações básicas padronizadas é a possibilidade de utilização de catálogos para a busca de princípios de solução, como apresentado por ROTH (1982), por exemplo. Nestes catálogos os princípios de solução são tabelados de acordo com a operação básica e com os fluxos manipulados: energia, matéria ou informação. Abre-se desta forma uma possibilidade de automação parcial do projeto conceitual pela formação de banco de dados computacionais de princípios de solução.

UMEDA e TOMIYAMA (1997) apontam uma dificuldade na aplicação do modelo de descrição funcional segundo a escola alemã (ou modelos funcionais de transformação). Conforme estes autores, tal modelo é limitado para descrever funções que não transformam nada, como por exemplo, ‘fixar’ e ‘guiar’. Para resolver este tipo de função com a abordagem de transformação é necessário construir uma estrutura funcional complexa.

As dificuldades na aplicação da abordagem de transformação também são apontadas por OGLIARI (1999), onde se mostra que existe uma tendência à particularização das funções do produto, conforme o domínio de aplicação. Esta tendência pode ser explicada, em parte, pela dificuldade em tratar com funções num nível muito abstrato, onde o fluxo de grandezas físicas não se apresenta de modo evidente.

MENDES (2001) descreve a dificuldade em proceder a decomposição funcional de determinados sistemas, já que, segundo o autor, o desmembramento num nível de detalhamento da ordem de funções e operações elementares incorporariam conjuntos demasiada e desnecessariamente complexos. Por exemplo, a função ‘obtenção do vácuo’ é desempenhada por um sistema de bombeamento, comercialmente disponível, não sendo interessante, do ponto de vista

do projeto, explicitar a decomposição desse subsistema, mas sim integrá-lo como um bloco ao sistema técnico.

De acordo com MAFFIN (1998), a principal dificuldade na utilização do modelo funcional segundo a escola alemã reside no processo de translação ou transformação dos requisitos do usuário dentro de funções que convertem ou canalizam matéria, energia ou informação. Segundo o autor, o projetista deverá ter longa experiência para expressar necessidades e requisitos do usuário diretamente em estruturas de funções de transformação. MAFFIN (1998) ressalta que esta pode ser a razão pela qual este tipo de estrutura funcional não é aceita pelo projetista com experiência prática e industrial.

Outro problema nas estruturas de funções de transformação é que elas não estabelecem uma distinção clara entre atributos e energia ou matéria, pois em alguns casos as entradas e saídas são tratadas como atributos (variáveis ou propriedades) em outros momentos são vistas como a matéria ou energia em si. Conseqüentemente, estes diagramas acabam permitindo uma dupla interpretação para o projetista: a) Como funções que recebem matéria e/ou energia e transformam-nas em matéria e/ou energia que estarão presentes em outro(s) local(is); b) Como funções que, em decorrência do valor dos atributos da energia e/ou matéria nos arcos direcionados para o bloco de função (utilizando-se diagramas de blocos), provocam a modificação do valor dos atributos da energia e/ou matéria indicados junto aos arcos que saem do bloco da função.

A figura 2.3, extraída de PAHL e BEITZ (1989), ilustra uma máquina de colher batatas. Considerando o ponto de vista dos autores, o fluxo principal expressa a transformação sobre as batatas no solo até obterem-se batatas selecionadas, ou seja, o modelo mostra os diversos estados assumidos pelo material, sendo estes estados caracterizados pelos tipos de elementos que os compõem. Entretanto, as saídas secundárias das funções peneirar, separar (1), separar (2) e classificar dão a idéia que os subprodutos são colocados em diferentes locais e não uma representação de mudança de estado das saídas.

Conseqüentemente, com respeito ao fluxo principal, o projetista pode também compreender que as saídas das funções mencionadas representam novos locais das batatas. Por outro lado, é possível executar estas quatro funções mantendo as batatas selecionadas no mesmo local. Dessa forma, o modelo funcional apresentado na figura 2.3 mostra-se ambíguo em relação ao fluxo de matéria, pois tanto permite a representação da mudança dos atributos das batatas como também da mudança da localização onde são colocadas.

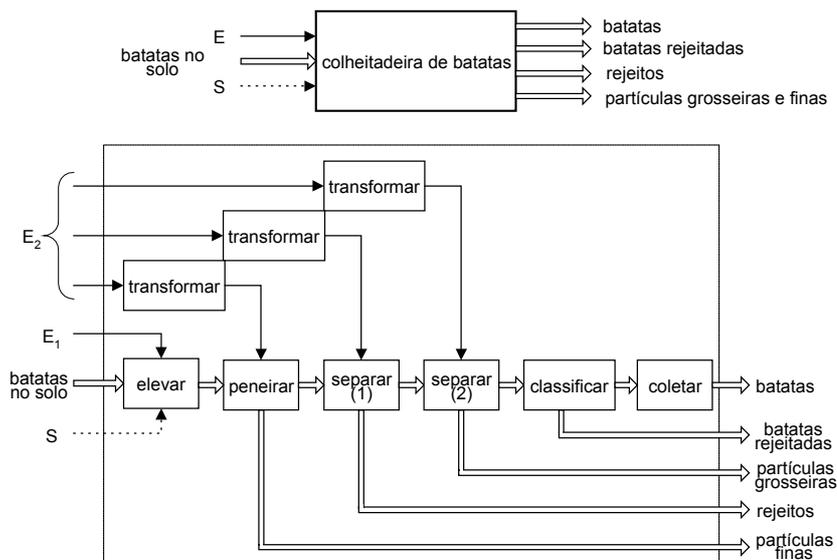


Figura 2.3 – Máquina de colher batatas (PAHL e BEITZ, 1989).

### 2.3.2 Descrição funcional segundo a norma VDI 2860 (1990)

A norma VDI 2860 (1990) propõe um conjunto de operações básicas padronizadas para sistemas de manipulação e montagem, em que tais operações são representadas por símbolos. A figura 2.4 mostra os símbolos e seus significados, distinguindo-se símbolos básicos (manipular, testar e processar), símbolos para funções elementares (ramificar, unir, girar, liberar, fixar) e funções suplementares como armazenagem desordenada. A norma VDI 2860 também apresenta regras de refinamento funcional em que, dada uma determinada função, é possível obter uma estrutura funcional similar com funções mais elementares (segundo a classificação da norma). Um exemplo deste processo é apresentado na figura 2.5.

A descrição funcional baseada na norma citada é ilustrada na figura 2.6. A partir da definição do problema, dado inicialmente através de uma estrutura funcional abstrata (com menor número de símbolos e menor detalhamento), pode-se chegar à estrutura funcional e em seguida ao mecanismo que realiza o requisito de projeto.

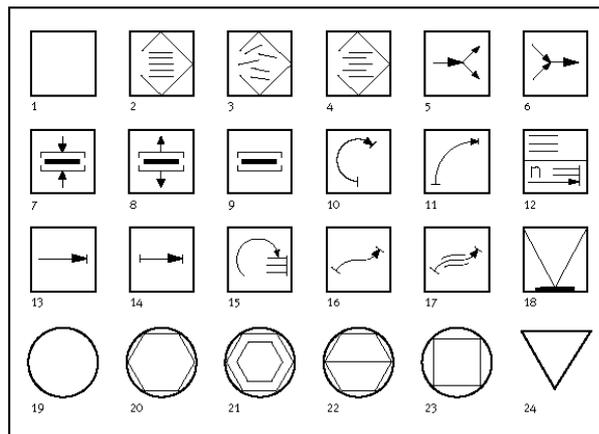


Figura 2.4 – Símbolos básicos para as funções de manipulação: 1. Manipular (símbolo básico); 2. Armazenar ordenadamente; 3. Armazenar desordenadamente; 4. Armazenar semi-ordenadamente; 5. Ramificar; 6. Unir; 7. Fixar; 8. Liberar; 9. Fixar (sem ação de força); 10. Girar; 11. Rodar; 12. Distribuir (n peças); 13. Posicionar; 14. Deslocar; 15. Selecionar; 16. Despachar em frente; 17. Guiar (mantendo a orientação da peça); 18. Testar; 19. Processar (símbolo básico); 20. Modificar forma; 21. Tratar (modificar propriedades do material); 22. Juntar (montar); 23. Modificar superfície; 24. Testar (símbolo básico).

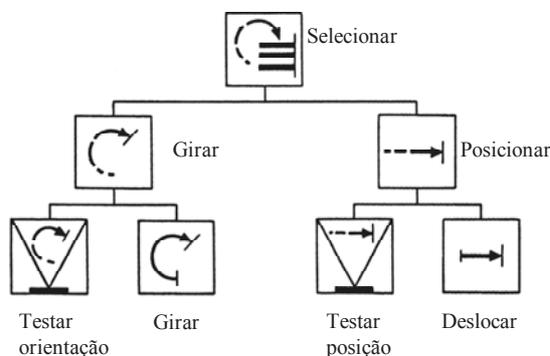
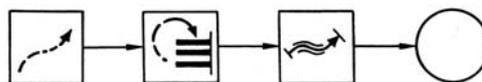


Figura 2.5 – Exemplo de refinamento funcional segundo VDI 2860 (1990).

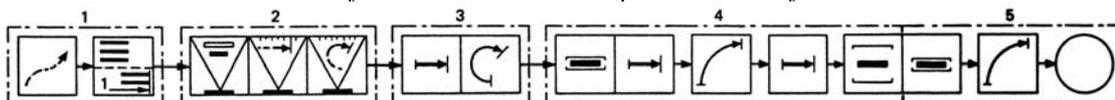
A partir da figura 2.6 pode-se observar que a norma VDI 2860 segue as orientações gerais estabelecidas pela descrição funcional segundo a escola alemã de projeto. Por conseguinte, os problemas de interpretação são similares aos citados na seção 2.3.1. Inicialmente, observando a figura 2.6, na estrutura funcional obtida os símbolos desenhados sem a seta de conexão representam aquelas operações executadas simultaneamente. Por sua vez, a linha pontilhada representa o conjunto de funções associado a um princípio de solução, ou como mostra a figura 2.6, a dispositivos mecânicos de manipulação e processamento.

*Especificação: ordenamento de processamento de partes.*

Transportar → Ordenar → Guiar → Processo



*Estrutura funcional obtida com respectivo sistema físico:*



1(Transportar → Distribuir) → 2(Testa identidade → Testar posição → Testar orientação) → 3(Deslocar → Girar) 4(Fixar → Deslocar → Rodar → Deslocar → Soltar) → 5(Fixar → Rodar → Processo).

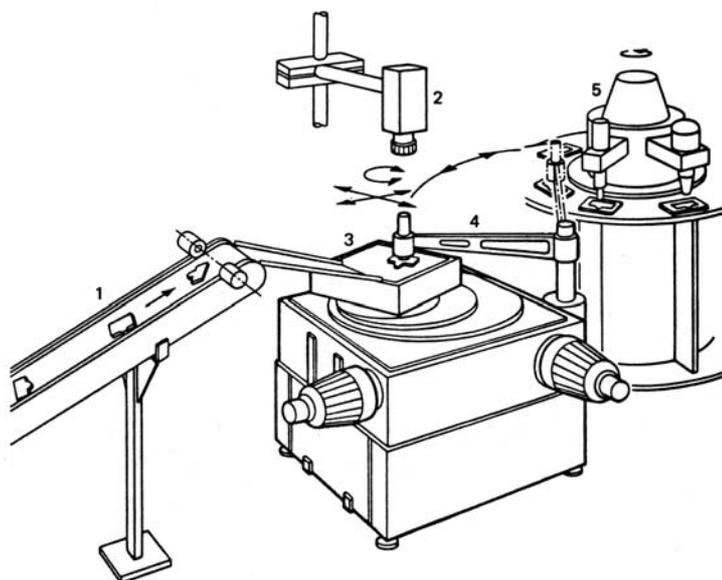


Figura 2.6 – Exemplo de processo de refinamento funcional segundo a VDI 2860 (1990).

Desta forma, em determinadas situações a estrutura funcional modela o fluxo de matéria no sistema e em outras modela a seqüência de operações executadas sobre a matéria. Segundo PULM e LINDEMANN (2001) a abordagem alemã baseada em descrições de fluxo de matéria, energia e informação modela adequadamente a operação do sistema, o que pode ser confirmado ao se observar o exemplo apresentado na figura 2.6. Nesta, observando os símbolos utilizados pela VDI 2860 (1990), é possível interpretar a operação do sistema de acordo com a seqüência funcional.

Entretanto, o modelo funcional derivado da VDI 2860 (1990) apresenta ambigüidade em relação ao fluxo principal (matéria). Reportando-se novamente a figura 2.6, é possível interpretar o modelo funcional de duas formas: na primeira, o modelo representa a seqüência de operações do sistema

projetado, através da correta ordenação dos símbolos; na segunda, o modelo representa o fluxo de matéria através dos diversos subsistemas que compõem o sistema projetado. Por conseguinte, o projetista poderá interpretar tanto a seqüência de operações como o fluxo de matéria no mesmo modelo, mesmo que em alguns momentos esta dupla interpretação leve a formulações incorretas sobre o funcionamento e a estrutura do sistema.

Dessa forma, a utilização da norma VDI 2860 (1990) com a sua base de símbolos funcionais parece ser mais adequada através da associação conjunta da estrutura funcional com o sistema concebido. Este aspecto justifica o uso da norma como ferramenta de análise funcional de sistemas construídos, uma vez que é possível identificar claramente o ordenamento de operações executadas por estes.

### **2.3.3 Descrição funcional segundo a abordagem denominada “Representação Funcional”**

A abordagem denominada *representação funcional* (RF) foi originalmente proposta por SEMBUGAMOORTHY e CHANDRASEKARAN (1986), objetivando descrever processos causais que resultam em funções de mecanismos. CHANDRASEKARAN (1994) descreve a RF de um mecanismo a partir de três partes:

- A descrição da função intencionada (independente de como a função é realizada) – modelo funcional;
- A descrição da estrutura do mecanismo – quais os componentes que o formam e como eles são conectados – modelo estrutural;
- A descrição de como o mecanismo realiza sua função, especificamente uma descrição do processo – modelo comportamental.

De acordo com CHANDRASEKARAN (1994), existem alguns trabalhos relacionados à RF que descrevem a função como uma “caixa preta”, ou seja, nenhuma hipótese é feita sobre sua estrutura interna e também sobre qualquer processo existente no mecanismo. Em linhas gerais, CHANDRASEKARAN (1994) propõe que a função seja representada pela descrição do contexto de sua aplicação, pelas condições iniciais e os predicados que o mecanismo tem que satisfazer para ele alcançar sua função.

Ainda segundo CHANDRASEKARAN (1994), a RF combina a descrição da função com a forma como um determinado mecanismo a alcança, através da adição de descrições da estrutura e de processos causais que fazem a função acontecer no mecanismo em questão. O autor enfatiza na RF a independência entre a função e o como ela é alcançada, distinção esta fundamental da representação de função na RF.

Para representar a estrutura de um mecanismo, CHANDRASEKARAN (1994) propõe a utilização direta de listas de componentes e suas funções e a indicação de como os componentes

são combinados de maneira a formar o mecanismo, ou seja, uma descrição das relações entre os componentes. As funções dos componentes são descritas utilizando as mesmas idéias da descrição de funções de mecanismos apresentada anteriormente.

A descrição de como o mecanismo realiza sua função é o que CHANDRASEKARAN (1994) denomina “descrição do processo causal” (DPC). Esta descrição mostra como um mecanismo evolui num processo causal de transição de estados em que o estado inicial representa o instante em que o mecanismo inicia seu funcionamento, o estado final representa a realização da função para a qual ele foi projetado e cada transição de estados é explicada através do conhecimento sobre componentes. A DPC pode ser entendida como um grafo cujos nós são predicados sobre os estados do mecanismo e os arcos as transições causais.

Diversos trabalhos utilizam a abordagem de RF, sendo na maioria relacionados a área de inteligência artificial (CHANDRASEKARAN, 1994) (CHANDRASEKARAN e JOSEPHSON, 1996a) (CHANDRASEKARAN e JOSEPHSON, 1996b) (KEUNEKE, 1991) (ALLEMANG, 1991) (PEGAH et al., 1993). CHANDRASEKARAN (1994) enumera como principais aplicações da abordagem de RF a diagnose, simulação, projeto, re-projeto, verificação de projeto, criação de bibliotecas de mecanismos, dentre outros.

Outros autores da área de projeto utilizam algumas das idéias apresentadas na abordagem RF, cuja principal característica é atrelar o conceito de função de um objeto ou sistema ao seu comportamento. É o que faz ULLMANN (1993) quando afirma que função é o comportamento necessário para cumprir os requisitos de um projeto ou UMEDA et al. (1990), UMEDA e TOMIYAMA (1995), WELCH e DIXON (1992) e SHIMOMURA et al. (1995), ao afirmarem que função é uma descrição do comportamento abstraída pelo homem através do reconhecimento deste comportamento a fim de utilizá-lo. A função é então vista como uma imagem dos comportamentos abstraídos pelo homem, e em geral é representado na forma de “fazer algo”.

Nessa abordagem, uma função é realizada por um sistema por meio de um dado comportamento, ou seja, uma seqüência - discreta ou contínua - de estados deste sistema. Assim, um sistema físico quando submetido a um dado estímulo, comportando-se de uma determinada forma, produz uma determinada resposta. Há de se realçar o caráter intencional implícito no conceito de função: estimula-se o sistema com o propósito de que o mesmo responda de uma determinada forma.

Dessa forma, um mesmo sistema físico pode desempenhar diversas funções através de distintos comportamentos. Também é possível que o mesmo comportamento possa gerar mais de uma função, dependendo da forma como o mesmo é percebido pelo homem – percepção esta de sentido utilitário. Por outro lado, uma mesma função pode ser desempenhada por diversos sistemas. A figura 2.7, extraída de UMEDA et al. (1990), ilustra os conceitos de estado, comportamento e funções de um sistema.

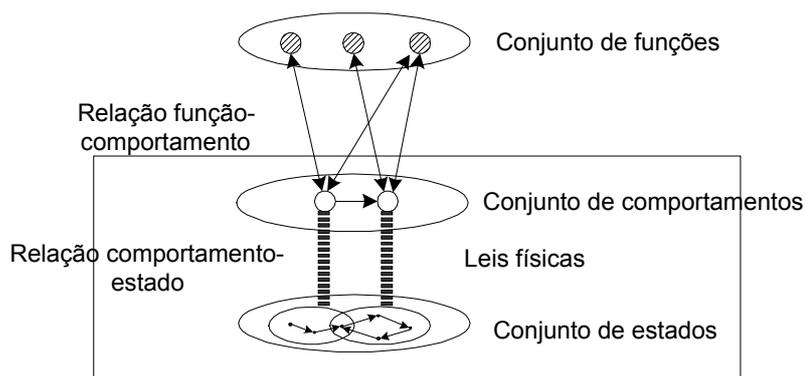


Figura 2.7 – Relações entre função, comportamento e estados (UMEDA et al., 1990).

A ferramenta computacional desenvolvida por UMEDA et al. (1996) (descrito também em UMEDA e TOMIYAMA (1995) e UMEDA e TOMIYAMA (1997)) na Universidade de Tóquio denominado modelador FBS (do inglês função-comportamento-estrutura) dá suporte a este conceito fundamental da RF. O modelador FBS primeiramente auxilia o projetista no processo de decomposição e estruturação funcional pois, na definição da classe função (dentro da filosofia da orientação a objetos), esta possui como uma de suas variáveis um conjunto de sub-funções candidatas à sua decomposição. A seguir, o modelador auxilia o projeto na busca por comportamentos capazes de cumprir as funções na estrutura funcional anteriormente desenvolvida. Forma-se, desta maneira, o que UMEDA et al. (1996) denominam “rede de vistas”. De posse desta rede, o modelador executa simulação do comportamento previsto para o sistema. Como resultado desta simulação pode-se detectar possíveis fenômenos irrealizáveis, efeitos colaterais e funções irrealizáveis.

#### 2.3.4 Descrição funcional segundo a abordagem denominada “Engenharia de Requisitos”

CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996) ressaltam que a especificação dos requisitos de um sistema a ser construído é uma área de grande importância na engenharia de projeto, tornando-se uma área específica denominada *Engenharia de Requisitos*. Nesta área, a modelagem funcional oriunda da RF é estendida no sentido de permitir a adequada representação os requisitos funcionais do sistema em projeto.

Segundo CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996), nos trabalhos relacionados a RF, a função é tratada como uma propriedade de um objeto ou mecanismo, muitas vezes uma abstração de um comportamento selecionado de um mecanismo. Esta definição expressa uma intenção do projetista ou usuário, que por sua vez é uma abstração do comportamento. Entretanto, os autores observam

que, seguindo este raciocínio, a função não pode ser definida sem obter-se o mecanismo em primeiro lugar.

Desta forma, CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996) ressaltam que a definição de função não poderá fazer qualquer referência à estrutura de algo que ainda não está projetado. Nesse sentido, os autores afirmam que a abordagem denominada RF é adequada a diversas aplicações, mas a separação das propriedades do objeto do conceito de função ajuda a aumentar a aplicabilidade da descrição funcional. Quando a função é definida sem qualquer referência a estrutura de um objeto, diferentes realizações da função tornam-se possíveis.

Assim, CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996) propõem que a função de um objeto é o efeito deste no ambiente. Segundo estes autores, o usuário intenciona – tem a proposta de causar – um certo efeito no seu mundo e, caso um objeto ou mecanismo possa criar ou gerar este efeito, então se pode atribuir o efeito criado ou gerado como uma função do objeto. Nesse contexto, a função de um objeto não é o efeito nele mesmo, mas o efeito no meio, de forma que ambos (causa e efeito) na definição funcional são externas ao objeto.

Seguindo a abordagem de CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996), o problema remanescente é, dado um efeito, como relacioná-lo a uma função de um objeto? Segundo os autores, é necessário descrever o “modo de desdobramento” do objeto de forma a relacionar o objeto e o efeito de interesse. O “modo de desdobramento” especifica como um objeto será conectado ao meio e como será configurado tal que o meio possa afetar certas propriedades selecionadas do objeto e este possa afetar certas propriedades do meio. Isto é realizado definindo-se portas de diferentes tipos para o objeto e descrevendo que portas do objeto são conectadas a que portas do meio.

Os autores então definem o significado descrito no parágrafo anterior: dada uma função  $F$  e um objeto  $O$ , e um “modo de desdobramento”  $M$ , pode-se dizer que  $F$  é uma função de  $O$  se existe um “modo de desdobramento”  $M$  tal que  $O$  sob  $M$  causa os efeitos especificados em  $F$  sobre determinadas condições. Assim, o conceito de função é isento em relação a se o efeito no meio é intencional, como no domínio de mecanismos, se é indesejado (mau funcionamento de um mecanismo) ou simplesmente uma descrição de um fato.

Nesta abordagem, os mecanismos são modelados com tendo portas de entrada e saída. Tais portas servem para alcançar duas representações: primeiro, portas de entrada são os locais onde as ações executadas pelo usuário invocam a função do mecanismo, enquanto portas de saída são os locais onde o mecanismo fornece ou disponibiliza a função (por exemplo, um sinal de baixa amplitude na entrada do amplificador que gera como saída um sinal amplificado); segundo, portas são locais de conexão com outros mecanismos de forma a criar-se mecanismos adicionais (por exemplo, conectar a saída de um amplificador a entrada de outro amplificador de forma a produzir um sinal com maior fator de amplificação).

### 2.3.5 Descrição funcional segundo uma abordagem de projeto de sistemas mecatrônicos

De acordo com PULM e LINDEMAN (2001), um dos principais problemas na atividade de descrição funcional é escolher qual modelo será utilizado. Este problema torna-se maior no contexto de sistemas mecatrônicos, uma vez as diversas abordagens individuais (mecânica, eletrônica e informática) devem integrar diferentes tipos de descrições funcionais de forma a alcançar uma adequação a este tipo de sistema. Autores como BUUR (1990), HILDRE et al. (1996) e SHAKERI (1998), que tratam de sistemáticas de projeto para sistemas mecatrônicos, propõem a utilização de diversos modelos para descrever a funcionalidade de tais sistemas.

A partir do estudo destas abordagens observa-se a utilização conjunta de modelos oriundos de áreas distintas, sejam aqueles utilizados na escola alemã de projeto até modelos normalmente empregados na área de informática e/ou eletrônica. Conforme apontado por SHAKERI (1998), a despeito do fato de que existe uma concordância entre os pesquisadores que o termo *mecatrônica* é a combinação ou integração das áreas mecânica, eletrônica e informática, parece não haver consenso sobre o tema ‘*modelagem de sistemas mecatrônicos*’ em função do grande número de modelos disponíveis para a utilização no projeto de tais sistemas.

Apresenta-se a seguir a abordagem proposta por BUUR (1990) e SHAKERI (1998) onde é abordada a descrição funcional no contexto do projeto de sistemas mecatrônicos. Uma primeira observação das abordagens voltadas aos sistemas mecatrônicos é o emprego de *funções propostas* e a concordância com a lei da *causalidade vertical* formulada por HUBKA (1980), temas apresentados no decorrer desta seção.

Conforme descrito em HUBKA e EDER (1988), os sistemas técnicos realizam (exercendo seus efeitos) a transformação dos operandos (matéria, energia e informação) através de processos. Dentro dessa visão, uma máquina não é em si um processo técnico, ela exerce os efeitos necessários para o processo acontecer. Os efeitos criados pela máquina são definidos por ANDREASEN (1993) como *funções propostas*.

ANDREASEN (1993) e BUUR (1990) distinguem as funções de transformação de funções propostas através de formulações verbais distintas. A primeira é expressa na forma ‘{objeto (nome)} é {transformado (verbo)}’. A segunda é expressa de forma a denotar a proposta da máquina, que resulta na forma {ativar (verbo)} {efeito (nome)}. A tabela 2.1 a seguir mostra exemplos de componentes e as funções propostas e de transformação associadas.

Observando a tabela 2.1, a proposta de um motor é ‘criar rotação’ de forma a facilitar a transformação de algum objeto no sistema, onde o motor representa o componente. Caso se pergunte: “Como o motor cria rotação?”, então a resposta é: “Executando a transformação de energia elétrica em energia rotacional” (esse processo de transformação é uma das alternativas possíveis). Nesse contexto, BUUR (1990) observa que existe uma relação hierárquica entre funções

propostas e funções de transformação. Quando se pergunta sobre o efeito necessário para uma transformação, a resposta está na função proposta e, quando se pergunta sobre como os efeitos podem ser realizados, a resposta está na função de transformação num nível secundário.

Tabela 2.1 – Relação entre funções de transformação e funções propostas.

Componente	Função de Transformação	Função proposta
Motor	Energia elétrica é transformada em rotacional	Criar rotação
Amplificador eletrônico	Sinal elétrico é amplificado	Garantir amplitude suficiente
Bateria	Energia é armazenada	Fornecer potência

De acordo com BUUR (1990), o conceito de funções propostas foi derivado da observação de máquinas de transformação de materiais, pois nestas a distinção entre os dois conceitos de função é evidente. Os efeitos criados pela máquina podem ser descritos independentemente da transformação. Por outro lado, BUUR (1990) ressalta que para máquinas de transformação de energia, a distinção entre funções propostas e de transformação não é evidente. Uma engrenagem mecânica, por exemplo, transforma energia rotatória de uma velocidade de revolução para outra. Neste caso, torna-se difícil apontar os efeitos que a máquina exerce para realizar a transformação.

A conexão entre o grau de abstração e o grau de complexidade é outro aspecto importante apontado por HUBKA e EDER (1988). Segundo tais autores, refinar funções em funções parciais (menor grau de complexidade) é somente possível e sensato quando um grau de abstração concreto for obtido. Por sua vez, isto somente é verdade quando um princípio de solução foi estabelecido. Esta é a essência da lei de causalidade vertical formulada por HUBKA (1980). A causalidade reside no seguinte fato: uma vez que a função é formulada, então é possível designar uma série de alternativas como solução. Por sua vez, a decomposição de uma função em subfunções somente é possível quando um meio é escolhido para realizar tal função.

Segundo BUUR (1990), a árvore função/mecanismo é uma forma de ilustrar a lei de causalidade vertical, representando a descrição funcional hierárquica. Tal árvore pode ser decomposta numa estrutura de funções e numa estrutura de mecanismos. A primeira mostra as funções necessárias (no mais baixo nível) que realizam uma ou mais funções no nível mais alto. A segunda mostra os mecanismos necessários para executar a função. A figura 2.7 a seguir ilustra o leiaute da árvore função/mecanismo.

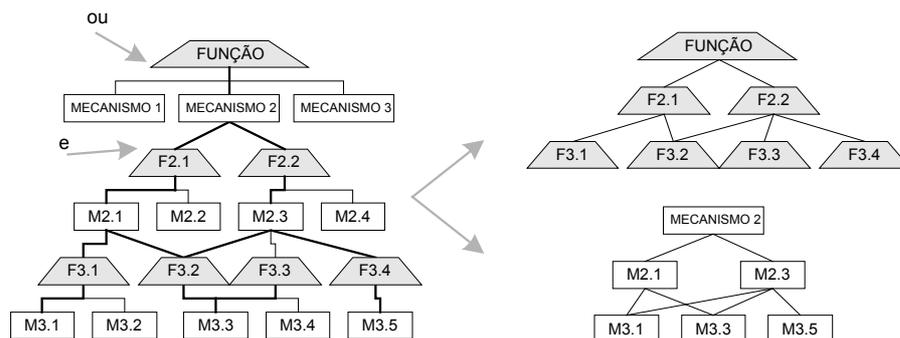


Figura 2.8 – Árvore função/mecanismo (SHAKERI, 1998).

Uma outra característica das abordagens voltadas a descrição funcional de sistemas mecatrônicos é a utilização de modelos suplementares. BUUR (1990) propõe complementar a descrição funcional (seja utilizando funções de transformação ou funções propostas) com modelos que explicitem os estados e transições do sistema. Segundo o autor, a descrição funcional de um sistema mecatrônico não pode ser considerada completa quando utilizando somente funções de transformação (fluxo de energia, matéria e informação) de acordo com os conceitos oriundos da escola alemã de projeto descritos anteriormente. BUUR (1990) ressalta que um sistema mecatrônico trabalha em diferentes estados e a função é dependente do estado do sistema e as transições entre estados são controladas por condições lógicas. Desta forma, a estrutura funcional de um sistema mecatrônico é variável e modifica-se com o estado momentâneo deste, podendo-se modelá-lo como uma máquina de estados finitos, ou seja, descrevendo-o em termos de estados e transições.

O exemplo mostrado na figura 2.9 ilustra a descrição funcional proposta por BUUR (1990). Observe que a cada estado do sistema (sala vazia ou sala ocupada) está associada uma estrutura funcional (figura 2.9c). A figura 2.9b ilustra a função de transformação do sistema.

Segundo HILDRE et al. (1993) e SHAKERI (1998), embora a utilização de diagramas de transição de estados junto com funções de transformação auxilie a descrição do comportamento lógico do sistema mecatrônico, essa abordagem é insuficiente e ineficiente para descrever todos os aspectos comportamentais do sistema. Nesse sentido, os autores propõem a utilização de diversos modelos que inserem perspectivas estruturais e comportamentais à descrição funcional do sistema projetado. SHAKERI (1998) utiliza, além da descrição funcional hierárquica (árvore função/mecanismo), modelos pertencentes a UML (por exemplo, diagramas de seqüência) (RUMBAUGH, et al., 1999).

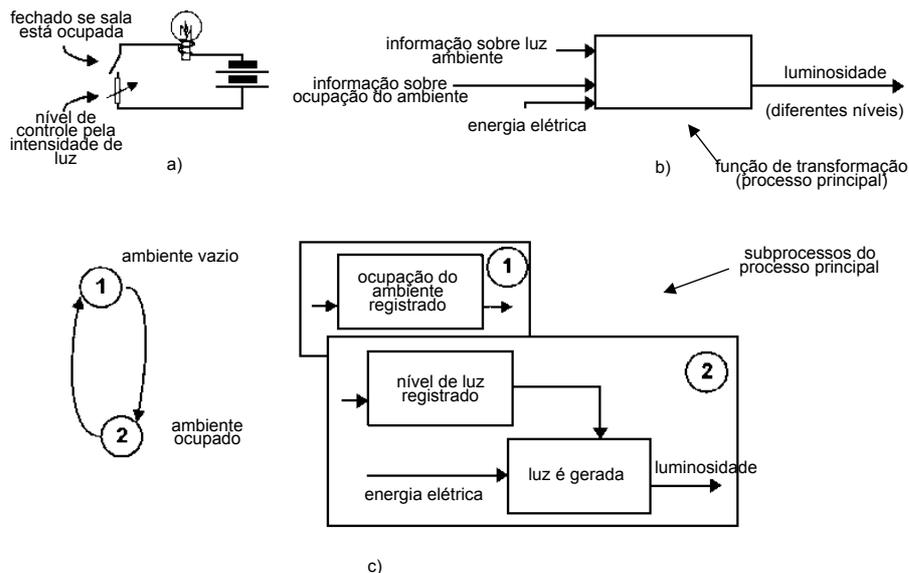


Figura 2.9 – Descrição funcional de um sistema mecatrónico (BUUR, 1990).

O processo de descrição funcional proposto por SHAKERI (1998) é ilustrado nas figuras 2.10 a 2.12 a seguir. O primeiro passo é formular a estrutura lógica do sistema mecatrónico, mostrada na figura 2.10 (o sistema tratado em SHAKERI é um toca disco digital). Em seguida a árvore função/mecanismo é construída para cada sistema (ou objeto).

Na figura 2.11a é ilustrada a árvore função/mecanismo para a unidade de rotação do disco. As relações entre o motor e engrenagem são ilustradas no diagrama de objeto (figura 2.11b). O objeto motor transfere torque (gera rotação) para a engrenagem e o objeto engrenagem transfere o torque (rotação) desejado para o disco. A ordem em que as funções são executadas pode ser ilustrada utilizando diagramas de seqüência, de acordo com a figura 2.11c. Tais diagramas podem ser diretamente construídos a partir da árvore função/mecanismo (ou a partir do diagrama de objetos), substituindo as instâncias pelos objetos. A figura 2.11c mostra que o objeto motor primeiro envia o torque para o objeto engrenagem que transmite a rotação desejada para o disco. A figura 2.11d mostra o leiaute físico da unidade de rotação.

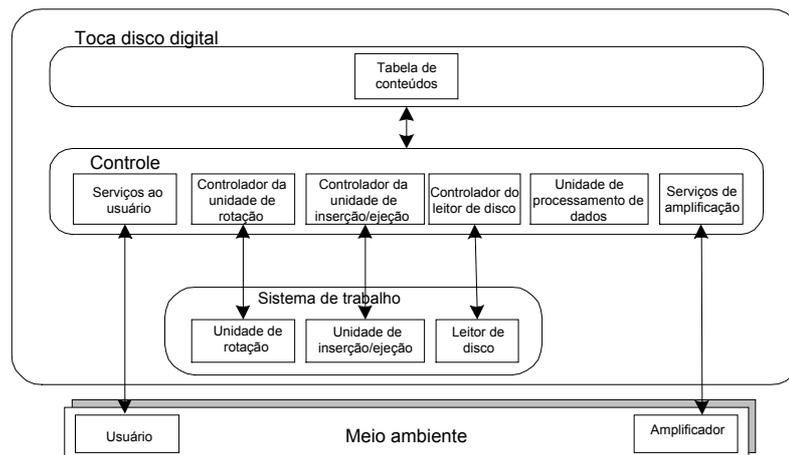


Figura 2.10 – Estrutura lógica de um toca disco digital.

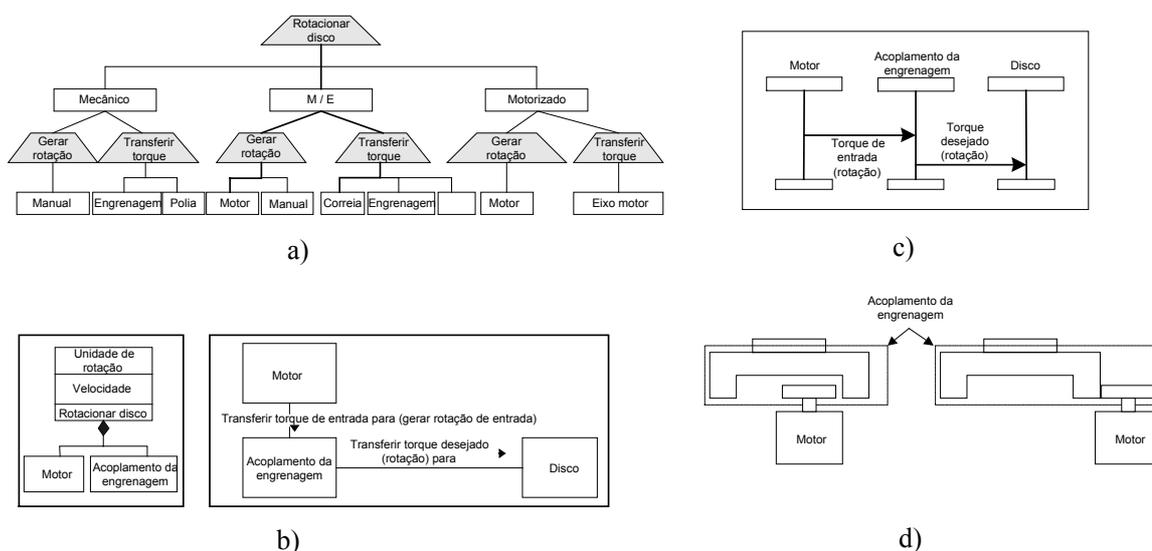


Figura 2.11 – Modelos utilizados por SHAKERI (1998) para a descrição funcional: a)Árvore função/mecanismo; b) Diagrama de classes para a unidade de rotação (relação entre motor, engrenagem e disco); c)Diagrama de seqüência para a função rotacionar disco; d)Leiaute físico com os dois princípios de solução para a unidade de rotação.

Quando os princípios de solução dos objetos constituintes do sistema físico são encontrados, inicia-se a especificação funcional para os objetos da parte de controle. A figura 2.12a mostra o princípio de acoplamento entre o controlador e a unidade de rotação. A árvore função/mecanismo para o controlador de rotação é construída, conforme ilustrada na figura 2.12b. A estrutura funcional encontrada ilustra as sub-funções necessárias que devem ser executadas de forma a

completar a tarefa de controle de rotação. A figura 2.12c ilustra a agregação da unidade de controle de rotação, representada em diagrama de classes. Da mesma forma, as relações entre os objetos constituintes da unidade são ilustradas na figura 2.12d.

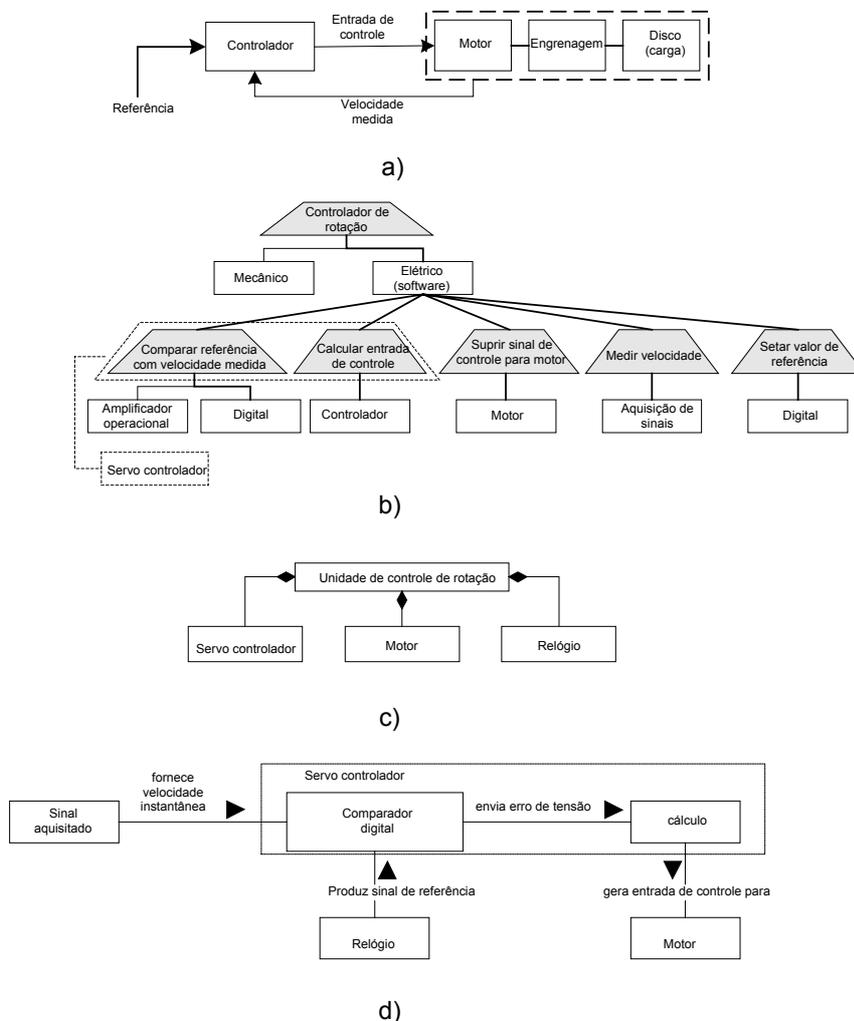


Figura 2.12 – Descrição funcional da unidade de controle de rotação (SHAKERI, 1998):

a) Acoplamento entre controlador e unidade de rotação; b) Árvore função/mecanismo para unidade de rotação; c) Diagrama de classes da unidade de rotação; d) Relações entre os objetos constituintes.

### 2.3.6 Descrição funcional segundo uma abordagem voltada ao projeto de sistemas automáticos

No contexto de sistemas automáticos, DE NEGRI (1996) ressalta que, durante a fase de projeto, é necessária a comunicação entre os diversos especialistas e também a inter relação das informações contidas nos diferentes modelos (diagrama de circuitos elétricos, desenhos técnicos,

diagramas de fluxo de dados, etc), sugerindo então a estruturação da descrição funcional do sistema em projeto em torno de um modelo central. Dessa forma, o modelo central tem o objetivo de armazenar todas as informações utilizadas pelos diferentes modelos e também coordenar o uso e atualização destes.

DE NEGRI (1996) utiliza como modelo central a rede Canal/Agência (rede C/A), que é criada na fase de concepção para capturar os requisitos funcionais e, a medida que o projeto evolui, é refinada progressivamente assumindo uma perspectiva estrutural. Podem ser criados modelos funcionais/estruturais próprios a cada solução técnica escolhida, como diagrama de circuitos e desenhos técnicos, diretamente relacionados à rede C/A. Os aspectos comportamentais são modelados por meios apropriados como funções de transferência e diagrama de estados, mas devem estar vinculados a uma agência da rede C/A.

De acordo com DE NEGRI (1996), a operação de um sistema energético ou com fluxo de material depende da ação de um sistema de informação, humano ou não, capaz de extrair informações do primeiro, processá-las e, posteriormente, utilizá-las para alterar o fluxo energético ou de material. Desta forma, um sistema automático pode ser modelado como um sistema de informação acoplado a um sistema energético e/ou de material através de canais de informação internos. Além da troca de informações entre estes dois subsistemas, há também o recebimento e fornecimento de energia, matéria e informação em relação ao ambiente externo. Esta perspectiva é modelada segundo a figura 2.13.

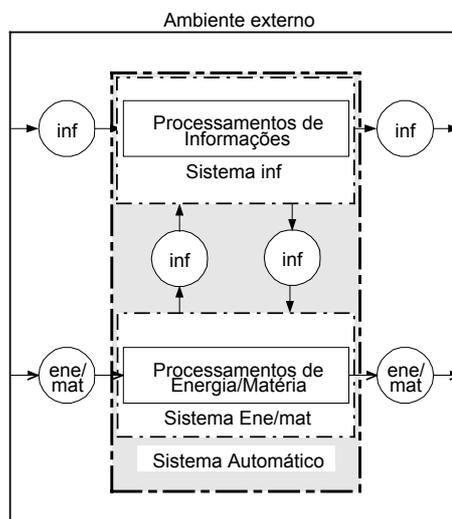


Figura 2.13 – Modelo funcional condensado de um sistema automático (DE NEGRI, 1996).

O sistema de informação constitui-se de instrumentos, programas, ser humano ou quaisquer outros meios que processem sinais. O sistema energético e de material é uma abstração das

máquinas, dispositivos, processos, etc, capaz de realizar transformações físicas ou químicas. Segundo DE NEGRI (1996), um sistema automático pode ser refinado, evidenciando assim os sistemas de medição e atuação que concretizam o fluxo de informações interno. Esse processo caracteriza a descrição funcional na atividade de projeto de sistemas automáticos proposto por DE NEGRI (1996).

Em DE NEGRI e PAES (2003) é ilustrada a descrição funcional de uma pequena central hidroelétrica, mostrada na figura 2.14, onde são descritas suas partes funcionais e estruturais. Inicialmente foi construída uma rede C/A correspondente ao tipo de turbina a ser empregada, no caso uma Francis. A seguir foi construída outra rede, agora da usina como um todo, desde a entrada d'água no caracol, a partir da montante, passando pela turbina até a geração de energia elétrica e saída d'água a jusante. São identificados todos os Sistemas de Atuação (SA), Medição (SM) e de Atuação-Medição (SAM).

No passo seguinte, verifica-se a necessidade de detalhá-los, ou seja, refiná-los de acordo com a complexidade do mesmo. Isto depende da experiência e do discernimento do projetista e do nível de detalhamento pretendido, podendo optar por diferentes formas de representação. Pode-se continuar representando por rede C/A, ou através de diagramas (mecânico ou elétrico) próprios da área de implementação e, portanto, amigáveis aos profissionais que irão executar a tarefa.

Em seguida realiza-se a decomposição da parte da informação do sistema automático. É utilizada uma rede C/A para representar um supervisor que comanda os subsistemas que compõem o funcionamento da usina, bem como os canais que interligam estes subsistemas. A partir desta rede são construídos os diagramas funcionais (IEC 848, 1988) hierarquizados que representam o comportamento do sistema e o diagrama de “Caso de Uso” que fará a ponte de ligação entre as representações físicas e a construção do programa de controle. Com base nos diagramas funcionais de cada um dos coordenadores, cada “caso de uso” dá origem a um Diagrama de Seqüência. Através das mensagens que chegam a cada um dos objetos nos diagramas de seqüência e na estrutura do diagrama de “caso de uso”, é construído o diagrama de classes. Por fim, constrói-se o programa (código fonte) utilizando, por exemplo, a linguagem C++. A figura 2.15 mostra este encaminhamento, o qual está ilustrado através das setas.

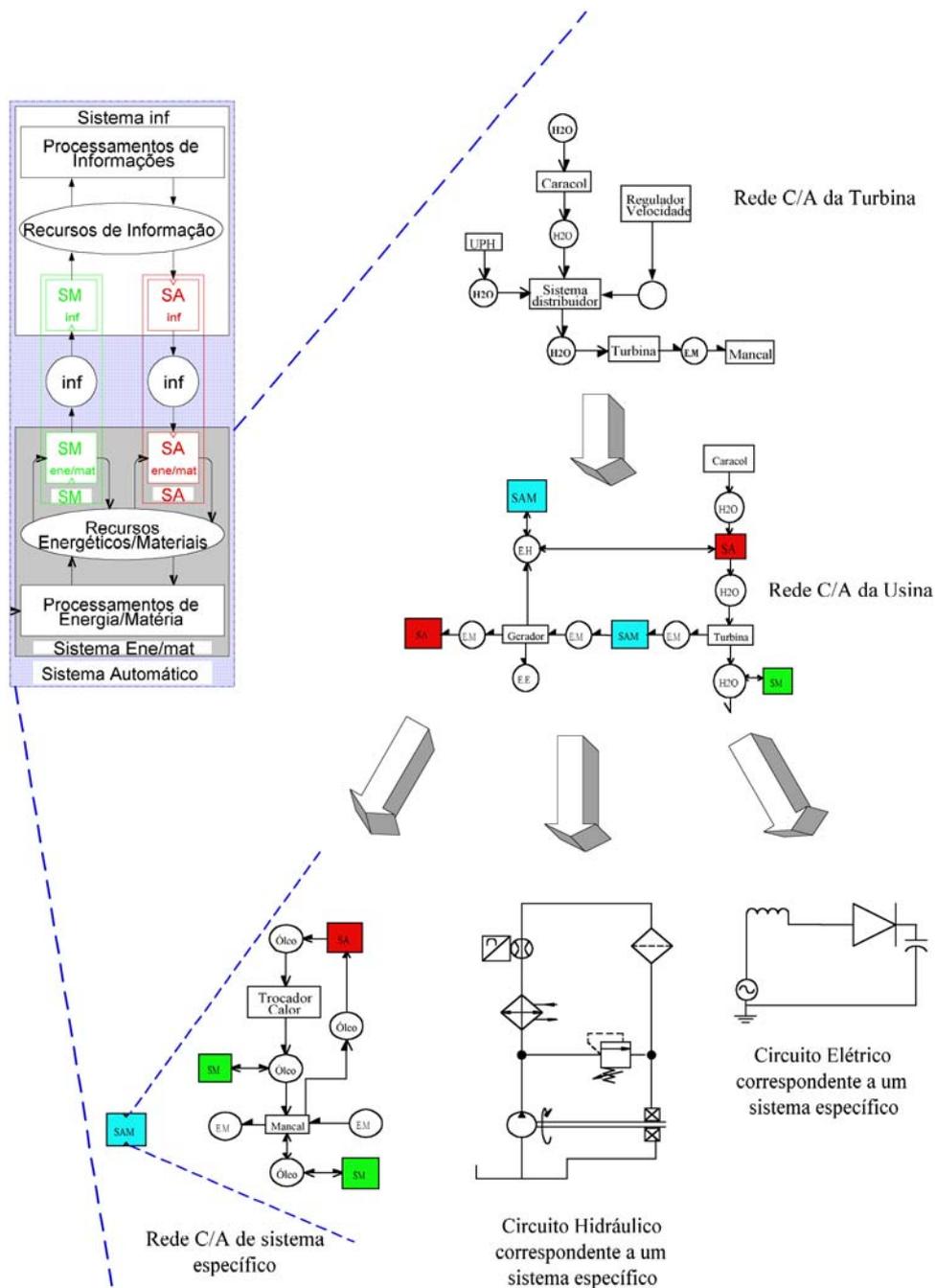


Figura 2.14 – Descrição funcional de uma pequena central hidroelétrica (DE NEGRI e PAES, 2003).

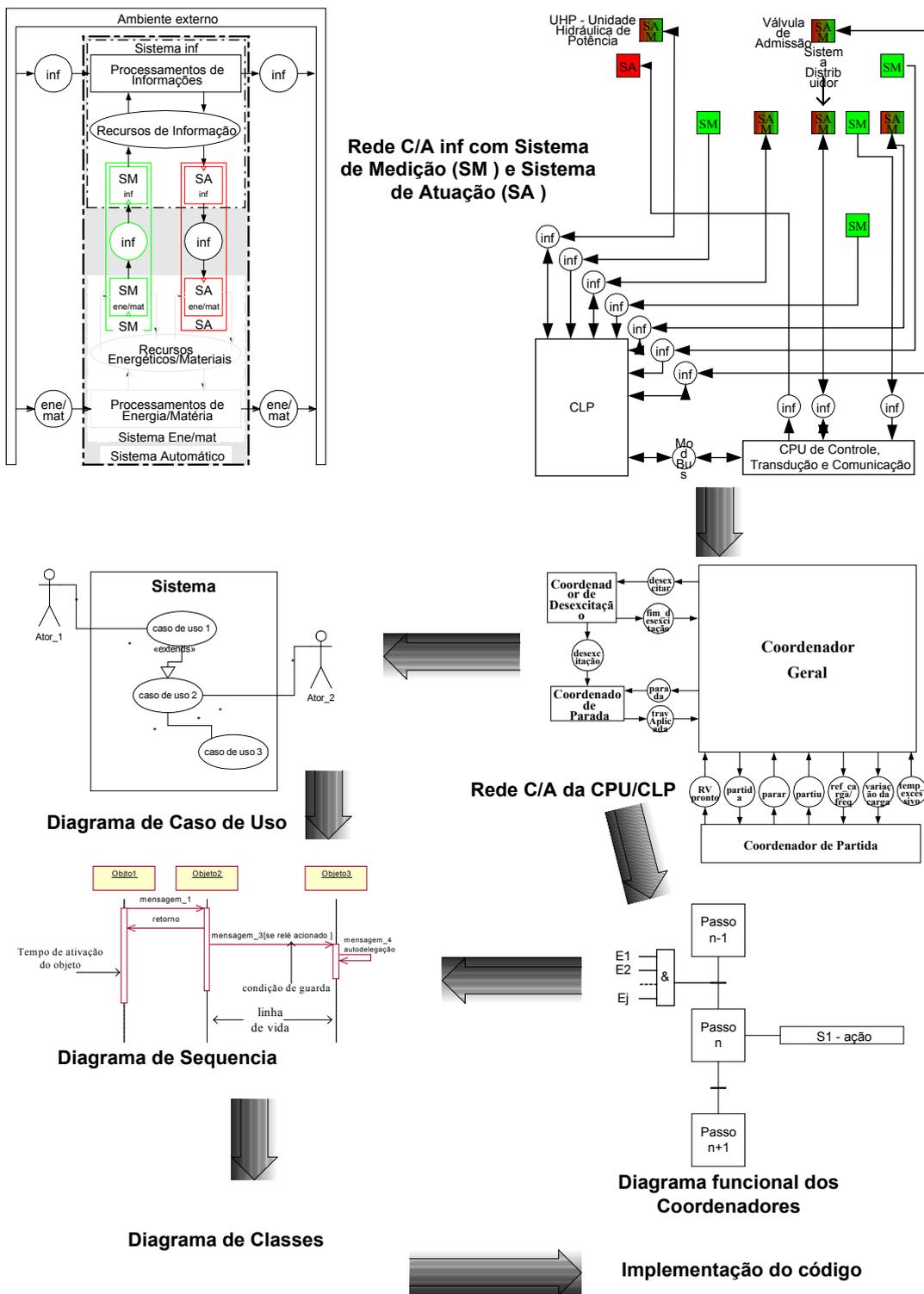


Figura 2.15 – Encaminhamento para o detalhamento da parte de informação de uma central hidroelétrica (DE NEGRI e PAES, 2003).

Caracterização da rede Canal Agência

A rede Canal/Agência (C/A), discutida em REISIG (1985), HANISCH (1992) e DE NEGRI (1996), é uma representação diagramática composta de dois elementos básicos: as unidades ativas, representadas por retângulos e as unidades passivas, representadas através de círculos, sendo estes dois elementos conectados através de arcos direcionados, conforme ilustra a figura 2.16. Utiliza-se a notação em rede Canal/Agência (rede C/A) que se presta para a descrição genérica de sistemas através de uma estrutura simples e de fácil assimilação por pessoas de formações diversas.

<b>Elementos básicos</b>			
Símbolo	Nome genérico	Perspectiva funcional	Perspectiva estrutural
□	Unidade ativa	Atividade (função)	Instância
○	Unidade passiva	Recurso	Canal
<b>Interconexão dos elementos</b>			
Símbolo	Tipo de recurso		
→	Fluxo de informação		
→	Fluxo de energia		
→	Fluxo de matéria		
→	Fluxo de energia e matéria		

Figura 2.16 – Rede Canal/Agência (rede C/A).

Segundo DE NEGRI (1996), ao modelo criado pode-se atribuir uma conotação funcional ou estrutural. Sob uma perspectiva funcional, as unidades passivas correspondem a um local onde se visualiza os recursos que fluem através do sistema, ou seja, a energia, a matéria e a informação ou suas formas de manifestação, tais como eletricidade, peças, ferramentas, sinais, dados, etc. Por sua vez, as unidades ativas são designadas atividades, correspondendo às operações aplicadas sobre os recursos. Como exemplos citam-se bombeamento, montagem, transporte, processamento, etc.

Pode-se inferir também uma perspectiva estrutural à rede C/A. Neste caso, as unidades passivas são designadas canais, indicando aqueles componentes do sistema que dão suporte para que os recursos possam fluir sem causar modificação no estado destes. Como exemplos, citam-se tubulações, eixos, fios, depósitos, memórias, etc. Através dos retângulos representam-se as agências que, conforme expresso em HEUSER (1990), correspondem aos “locais onde acontecem às atividades”, tais como bombas, componentes de máquinas, estações de trabalho, reatores químicos, objetos (software), entre outros.

O direcionamento indicado pelos arcos que acoplam estes elementos não tem significado sob o ponto de vista estrutural, pois este se refere à interligação existente, ao modo como o sistema é constituído. Por conseguinte, os arcos apenas indicam qual o componente passivo necessário para

estabelecer a conexão entre os componentes ativos. Por outro lado, funcionalmente as setas indicam o sentido do fluxo de recursos. Dessa forma, a rede C/A explicita a interligação física entre as máquinas ou dispositivos e também os canais por onde flui a matéria, sendo uma representação semelhante ao PFS – *Production Flow Schema* (MIYAGI, 1996).

A regra fundamental para o uso desta notação é que a interconexão é somente permitida entre canais e agências, ou seja, numa rede C/A não pode haver dois canais ou duas agências diretamente ligados através de arcos. Conforme ilustrado na figura 2.17, um arco de um canal para uma agência implica que a atividade pode depender, mas não necessariamente depende, do conteúdo do canal ou, em outras palavras, os recursos devem ser utilizados pela atividade. Por sua vez, um arco deixando uma agência indica que o conteúdo do canal pode ser alterado, mas não necessariamente, pela atividade, ou seja, o recurso deve ser produzido ou modificado pela atividade.

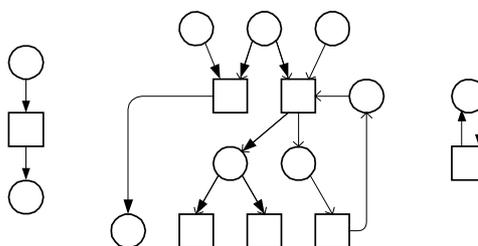


Figura 2.17 – Representação em rede C/A.

O refinamento de um canal ou uma agência consiste no detalhamento destes, identificando novos canais e agências, como ilustrado na figura 2.18. Da mesma maneira, canais e agências podem ser agrupados englobando elementos condensados. A rede refinada ou condensada deverá resultar também numa rede. Portanto, quando refinando um canal, os elementos da rede refinada que estão nos limites do canal original também devem ser canais. Da mesma forma, os elementos limitantes identificados no refinamento de uma agência também devem ser agências. Portanto, os arcos na rede condensada devem representar todas as direções dos arcos da rede refinada.

De maneira geral, o emprego da rede C/A como modelo central de descrição funcional, conforme proposto por DE NEGRI (1996), decorre dos seguintes aspectos:

- Emprega elementos fundamentais (recursos e atividades ou canais e agências), possibilitando a descrição dual de perspectiva funcional e estrutural;
- Destaca os recursos energéticos, materiais e de informação (através dos canais), cujos atributos são a real necessidade de criar-se sistemas técnicos;
- É totalmente dissociado de soluções de implementação ou fabricação;

- É equivalente à estrutura de funções empregada no projeto de produtos (o refinamento da rede equivale à decomposição funcional) e também é uma versão mais básica do diagrama de fluxos de dados (DFD) utilizado na engenharia de software;

- Apesar de estar num nível bastante abstrato pode, através de refinamentos utilizando a mesma notação, dar origem a representações mais concretas, equivalendo-se à estrutura que será construída;

- Os canais e agências (elementos ativos e passivos) possibilitam a documentação de todos os componentes como válvulas, motores, objetos em programas assim como suas interligações (tubulações, eixos, fios, mensagens etc.).

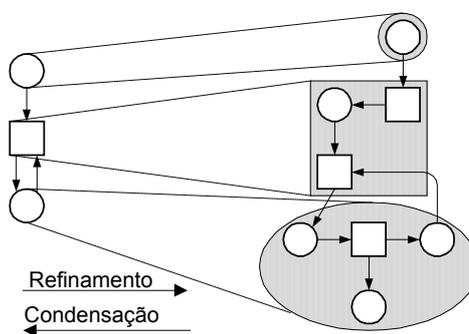


Figura 2.18 – Refinamento e condensação de uma rede C/A.

### 2.3.7 Descrição funcional segundo a uma abordagem voltada para o projeto de sistemas automatizados de manufatura

Segundo os trabalhos de MIYAGI (1996) e SANTOS FILHO et al. (2001), o projeto de um sistema de controle para sistemas de manufatura também deve ser conduzido através de uma descrição funcional (a partir de uma função abstrata inicial que representa o objetivo do sistema) que por sua vez deverá conduzir naturalmente a uma descrição do algoritmo de controle a ser implementado de forma que o sistema físico alcance seu objetivo. Em outras palavras, a sistemática de resolver o problema de projeto através da decomposição em sub-problemas de menor complexidade também é adotada na busca por uma concepção do sistema de controle.

Esta observação mostra que também no projeto do sistema de controle duas etapas são fundamentais: a descrição funcional e a síntese de soluções. Claro que aqui se está tratando de uma situação onde a funcionalidade está associada à forma como o sistema terá que se comportar para alcançar seu objetivo. Em outras palavras, a descrição funcional deverá utilizar modelos próprios que explicitem o fluxo de informações no sistema construído. De forma similar ao projeto físico

previamente tratado, o refinamento de tais modelos objetiva alcançar um modelo que seja uma concepção do sistema de controle (ou o programa de controle associado).

É importante ressaltar aqui, que nesta etapa se pressupõe a parte física já concebida, mesmo que em documentos de projeto. Desta forma, o projetista do sistema de controle tem como objeto de projeto uma planta previamente concebida, a partir do qual utilizará ferramentas matemáticas para alcançar uma descrição funcional e posteriormente um conjunto de soluções.

No contexto de sistemas de manufatura automatizados, MIYAGI (1996) utiliza dois modelos de descrição funcional: o PFS (*Production Flow Schema*) e o MFG (*Mark Flow Graph*) para a representação estruturada das funções de controle. Segundo o autor, devido à possibilidade de representação de processamentos paralelos, concorrentes e assíncronos, que são característicos do controle de SEDs, e pelo fato de versões de redes de Petri (Grafcet) estarem sendo utilizadas como linguagem de programação de CLPs, a aplicação de redes na representação do fluxo de controle é recomendável.

A descrição funcional baseada no modelo PFS/MFG baseia-se em aplicar a técnica de refinamentos sucessivos, de maneira que seja possível inserir progressivamente o detalhamento do processo dentro do modelo, correspondente ao comportamento desejado para o sistema. O PFS não representa o comportamento dinâmico de um sistema, uma vez que se trata de uma representação gráfica baseada em redes em que não há marcação, mas o fluxo de operações tendo como referência a evolução de um determinado processo (semelhante à rede C/A). O refinamento do modelo PFS leva ao modelo MFG, introduzindo neste a marcação como numa rede de Petri convencional (SANTOS FILHO et al., 2001).

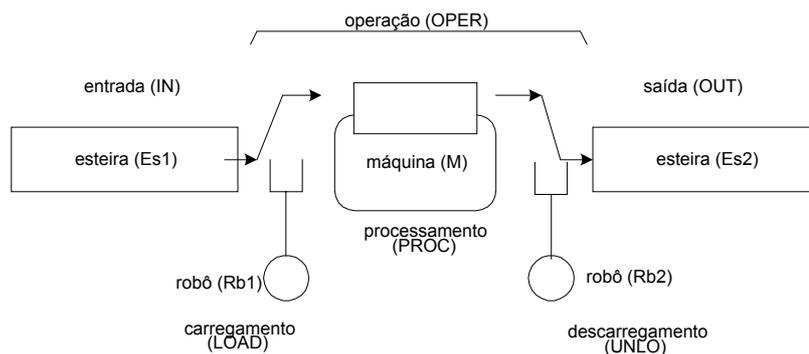
Inicialmente é utilizado o modelo abstrato PFS que representa o sistema físico a ser controlado, ou o modelo funcional da planta. A partir de sucessivos refinamentos deste modelo, chega-se ao grafo denominado MFG, que por sua vez modela a seqüência das operações e as conexões lógicas entre estas. Realizando ainda refinamentos do MFG obtém-se a representação da linguagem do controlador. A figura 2.19 a seguir ilustra a abordagem PFS/MFG sugerida por MIYAGI (1996). Desta forma, a partir do modelo funcional da planta gera-se o modelo funcional do sistema de controle, que por sua vez dará origem ao programa de controle (a ser obtido nas etapas subsequentes).

De maneira geral, na atividade de projeto de sistemas de controle observa-se uma grande utilização da rede de Petri (MURATA, 1989) e suas extensões como ferramenta de descrição funcional. Segundo HOLLOWAY et al. (1997), existem três principais abordagens que utilizam redes de Petri como ferramenta básica de projeto de sistemas de controle:

- Na primeira abordagem, a rede de Petri descreve o comportamento do sistema em malha fechada, ou seja, a planta e o controlador acoplados. Quando o comportamento desejado é alcançado, extrai-se a lógica de controle para implementação;

- Na segunda abordagem, a rede de Petri modela diretamente o controlador para uma determinada planta;

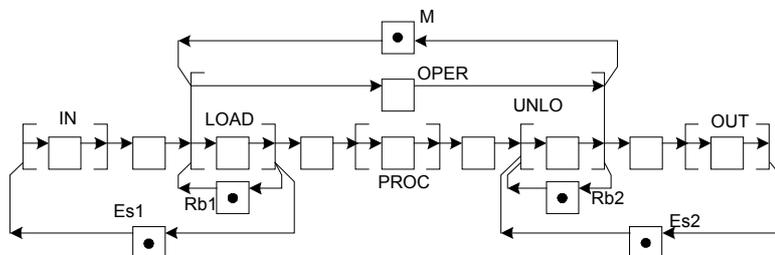
- A terceira abordagem insere procedimentos de síntese como normalmente realizado na teoria de controle contínuo. Existe uma rede de Petri que modela a planta e outra que modela as especificações desejadas, sintetizando-se um modelo que representa a planta confinada à especificação.



a) Exemplo de um sistema produtivo



b)PFS do sistema produtivo



c)MFG do sistema produtivo

Figura 2.19 – Metodologia PFS/MFG para projeto de controladores de SEDs (MIYAGI, 1996).

MORAES e CASTRUCCI (2001) também sugerem o projeto conceitual de controladores a partir da utilização de redes de Petri. O método é apresentado na figura 2.20, onde as siglas dos blocos têm os seguintes significados:

- RPP é a rede de Petri que modela a planta, os eventos externos que podem afetá-la e os eventos internos consequentes;

- RPS é a rede que se constrói a partir do refinamento da RPP anterior, acrescentando-lhe elementos lógicos e outros, com o objetivo de produzir a automação especificada;

- RPC é o conjunto dos controladores.

O final do projeto conceitual exige a decomposição da RPS em RPP, a planta original, e em RPC, o conjunto dos controladores. O modelo RPS deve ser desenvolvido em repetidos percursos, onde em cada um deles ocorrem acréscimos, alterações e verificações de desempenho por meio de álgebra e simulação determinística, até que as especificações sejam atendidas (MORAES e CASTRUCCI, 2001).

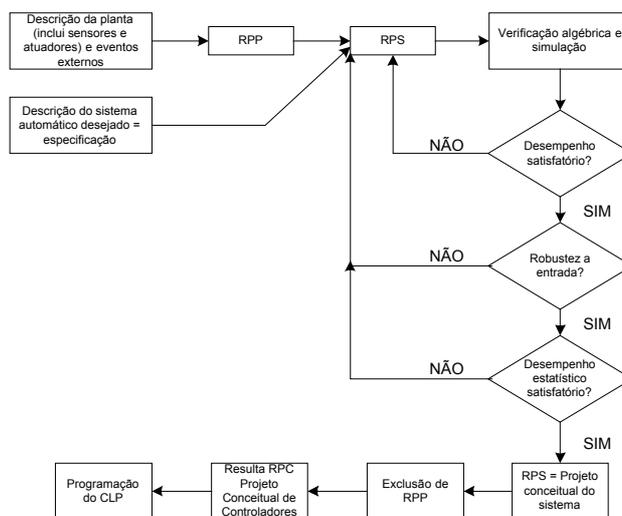


Figura 2.20 – Processo de projeto conceitual de controladores utilizando redes de Petri (MORAES e CASTRUCCI, 2001)

De qualquer forma, desde que uma grande parte da atividade de projeto de sistemas automatizados de manufatura é consumida na elaboração do sistema de controle, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no projeto conceitual no sentido de formalizar a obtenção de tais sistemas. Ressaltando este aspecto, MIYAGI (1996) afirma que apesar da diversidade de aplicações e da grande experiência acumulada nas aplicações práticas, a sistematização e a base teórica para o projeto conceitual de controladores ainda são muito incipientes. Em razão disso, existe uma intensa atividade de pesquisa voltada à busca de modelos matemáticos adequados a sua representação, sem que se tenha conseguido encontrar um modelo que seja matematicamente tão conciso e computacionalmente tão adequado como o são as equações diferenciais para os sistemas dinâmicos de variáveis contínuas.

Nesta atividade diversos modelos podem ser citados, sendo que tais modelos refletem os diferentes tipos bem como diferentes objetivos na análise dos sistemas em estudo. CURY (2001)

enumera os principais modelos utilizados para SEDs: Redes de Petri com e sem temporização, Redes de Petri Controladas com e sem temporização, Cadeias de Markov, Teoria das Filas, Processos Semi-Markovianos Generalizados (GSMP) e Simulação, Álgebra de Processos, Álgebra Max-Plus, Lógica Temporal e Lógica Temporal de Tempo Real, Teoria de Linguagens e Autômatos (RAMADGE e WONHAM, 1989). Entretanto, ressalta CURY (2001), nenhum dos modelos citados serve como paradigma. Os SEDs formam uma área de pesquisa de intensa atividade e desafios e constituem o tema onde são desenvolvidas abordagens para o projeto conceitual de controladores.

## 2.4 Conclusões

O presente capítulo abordou o projeto conceitual de sistemas técnicos, explorando a atividade de descrição funcional aplicada em diferentes áreas. Esta atividade é essencial no processo de projeto, pois é aqui que os requisitos do usuário, na forma de uma especificação de projeto, são levados a um modelo conceitual do sistema. O capítulo mostrou também que o projeto conceitual é uma das etapas do processo de projeto proposto por diversos autores, sendo aceito na literatura um modelo consensual formado de quatro fases: informacional, conceitual, preliminar e detalhado. Independente da área de aplicação, percebe-se que as metodologias existentes seguem este modelo, sendo diferenciadas pelas ferramentas, técnicas e modelos empregados nas diversas atividades.

De maneira geral, a descrição funcional é uma técnica utilizada na atividade de projeto para representar o produto ou sistema através de suas funcionalidades, seja através das funções que o produto ou sistema são capazes de realizar externamente com o ambiente, ou pelas funções internas a estes, realizadas pelas suas partes. Entretanto, observa-se que ainda não existe um modelo aceito como adequado que alcance o objetivo descrito quando aplicado às diversas classes ou tipos de sistemas técnicos. É este fato que motiva o estudo das diversas abordagens existentes de forma a explorar as especificidades de cada descrição funcional e propor um novo modelo que seja adequado ao projeto conceitual de SMMAs.

A partir do estudo das diversas abordagens que tratam da sistematização da atividade de projeto conceitual de um produto ou sistema, observa-se que, independentemente da área de aplicação, a etapa correspondente à descrição funcional é extremamente importante. Em resumo, esta etapa corresponde ao estabelecimento de uma função total abstrata e ao posterior desdobramento hierárquico desta em funções parciais menores. Esta abordagem subentende a estratégia de resolver um problema complexo dividindo-o em problemas menores, cujas soluções individuais são posteriormente integradas para compor uma solução total.

Por outro lado, apesar desta característica comum, observa-se que a descrição funcional leva em conta diversos fatores a depender da área de aplicação. O conceito diferenciado de função, a falta

de informações de determinados modelos funcionais (com conseqüente utilização de modelos de suplementação, como no projeto mecatrônico), a restrição de modelos funcionais a determinadas áreas, demonstra o que já foi apontado por diversos autores: não existe ainda um modelo consensual para a modelagem funcional.

Uma primeira diferenciação identificada nos modelos apresentados diz respeito ao conceito de função. De maneira geral, autores como PAHL e BEITZ (1989) expressam função como a relação entre as entradas e saídas (ou causas e efeitos) de um sistema, dissociada de qualquer sistema físico concreto. Observa-se também que trabalhos citados na literatura como *representação funcional* UMEDA et al (1996), UMEDA e TOMIYAMA (1995), SHIMOMURA et al (1995), atrelam o conceito de função ao conceito de comportamento. Entretanto, nessa abordagem, função é relacionada não somente ao comportamento físico, mas também à percepção do projetista deste comportamento. Assim, a função é representada como uma associação da intenção do projetista e o comportamento que pode realizar esta função.

A norma VDI 2860 (1990) utiliza a causalidade inerente à função de acordo com a escola de projeto alemã. A partir das figuras apresentadas na seção 2.3.2, pode-se observar que cada símbolo representa uma relação de causa e efeito e, também, traz dificuldades de entendimento semelhantes àquelas discutidas na seção 2.3.1. Sob o ponto de vista de CHANDRASEKARAN E KAINDL (1996), ambos, “causa e efeito”, na especificação da função são definidos exclusivamente em termos de propriedades externas ao objeto. Os requisitos do usuário são vistos como efeitos no mundo externo, enquanto os outros autores colocam os requisitos diretamente na própria função.

A descrição funcional proposta por BUUR (1990), DE NEGRI (1996) e SHAKERI (1998) está voltada à classe de sistemas que integram os componentes que realizam as ações físicas, ou seja, que processam energia e/ou matéria, juntamente com as funções de controle e processamento de informações. Nesse contexto, os autores citados mostram que a descrição funcional utilizada no projeto de produto (baseada em funções de transformação) é insuficiente e inadequada para um adequado processo de projeto conceitual. Segundo os referidos autores, é essencial inserir na descrição funcional a representação estrutural e comportamental do sistema em projeto.

BUUR (1990) utiliza para tal fim modelos suplementares ao modelo funcional (seja utilizando funções de transformação ou funções propostas), como diagramas de transição de estados ou redes de Petri. SHAKERI (1998) utiliza diagramas oriundos da UML (RUMBAUGH et al., 1999), onde através destes o sistema pode ser descrito de tal forma a permitir a representação estrutural (através dos diagramas de classes modela os objetos com seus atributos, operações, inter-relações, dentre outros) e a comportamental (através dos diagramas de seqüência).

DE NEGRI (1996) propõe a utilização de um modelo central, a rede C/A, de descrição funcional do sistema em projeto, em que à medida que a rede vai sendo refinada (detalhada) diversos diagramas são inseridos na descrição do sistema de forma a representar as perspectivas

estrutural e comportamental. De maneira geral, autores como DE NEGRI (1996) e SHAKERI (1998) procuram uma representação ou descrição do sistema onde os objetos do modelo conduzam naturalmente e eficientemente a entidades como fontes de mensagens ou eventos e seus alvos, mecanismos físicos (sensores e atuadores), processamentos de informações, elementos de controle (PIDs, por exemplo).

A descrição funcional proposta por MIYAGI (1996) é baseada na utilização de dois modelos, o PFS (*Production Flow Schema*) e o MFG (*Mark Flow Graph*), onde a partir do refinamento do primeiro chega-se ao segundo que por sua vez representa o programa conceitual de controle. Esta abordagem utiliza os fundamentos da rede de Petri, sendo dessa forma adequada para a descrição conceitual do sistema de controle.

Inicialmente, analisando as diversas abordagens para descrição funcional, observa-se que no contexto de SMMAs a visão de CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996) é a mais adequada, visto que em tais sistemas os efeitos no meio (externo ao objeto) é que caracterizam a manipulação, transporte e processamento da matéria. Como será visto no decorrer do trabalho, esta abordagem permite um tratamento coerente da junção da descrição funcional com a comportamental (através da teoria de Sistemas a Eventos Discretos).

Ainda em relação aos SMMAs (onde predomina o fluxo de matéria), o primeiro aspecto a ressaltar é que a rede C/A especifica os locais onde as funções são realizadas, os canais onde os efeitos são produzidos (processamento, transporte) e o sentido do fluxo de matéria. Assim, comparando com a área de representação funcional (UMEDA et al.(1990), UMEDA e TOMIYAMA(1995)), o modelo em rede C/A não especifica a função como uma abstração do comportamento do sistema, mas como uma entidade que realiza um efeito no mundo externo (nos canais). Dessa forma, a abordagem seguida no presente trabalho está de acordo com a perspectiva sugerida por CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996), onde a especificação de uma função é realizada através dos efeitos criados no mundo externo, ou nas ‘portas’ (CHANDRASEKARAN, 1994) da função.

Seguindo a análise das diversas abordagens de descrição funcional apresentadas, pode-se citar alguns pontos importantes para o modelo a ser proposto no presente trabalho, descritos a seguir:

- A atuação sobre a energia, matéria e informação é que dá sustentação a modelagem de um sistema técnico (PAHL e BEITZ, 1989) (HUBKA e EDER, 1988);
- A decomposição ou refinamento funcional utilizada nas diversas abordagens é ferramenta adequada para a descrição do sistema;
- É necessário integrar o modelo de descrição funcional com a representação estrutural e comportamental do sistema em projeto.

O primeiro e segundo pontos caracterizam aspectos já bastante fundamentados e consolidados na teoria de projeto de sistemas técnicos. Dessa forma, a abordagem de projeto conceitual,

principalmente no que diz respeito à atividade de descrição funcional, deve considerar a atuação do sistema sobre alguma forma de energia, matéria e informação (no caso de SMMA, o fluxo principal é de matéria). Também, o refinamento funcional deve ser considerado como uma técnica a ser seguida objetivando a concretização da representação do sistema em projeto, uma vez que no início se trabalha com um modelo funcional abstrato.

Sobre o último ponto, é importante destacar a tentativa de autores como DE NEGRI (1996), DE NEGRI e PAES (1993) e SHAKERI (1998) em inserir no modelo funcional estas representações. Pode-se destacar a utilização dos diagramas pertencentes à UML (RUMBAUGH et al., 1999) como modelos de representação estrutural do sistema em projeto. DE NEGRI (1996) utiliza a rede C/A como modelo central de descrição funcional, sendo que tal modelo, pelas suas características, insere naturalmente a representação estrutural do sistema. Já os modelos funcionais baseados em funções de transformação, incluídos aí os modelos utilizados na escola alemã e a simbologia da norma VDI 2860, carecem da representação estrutural, sendo desta forma suplementadas por outros modelos quando do projeto de sistemas formados por tecnologias distintas (como é o caso do projeto de sistemas mecatrônicos e sistemas automáticos).

Como diretriz geral no sentido de tratar o problema estrutural na atividade de descrição funcional, o projetista deve utilizar modelos que progressivamente e objetivamente conduzam à estrutura física do sistema em desenvolvimento, e esta ação deve ser iniciada ainda na fase inicial do projeto. Portanto, o modelo funcional criado deve explicitar a interconexão física dos objetos ou componentes, caracterizando assim um modelo funcional-estrutural. Nesse sentido, o presente trabalho propõe a utilização da rede C/A como modelo central de descrição funcional, assemelhando-se à abordagem seguida por DE NEGRI (1996). Pelas características discutidas anteriormente, a rede C/A é um modelo adequado a ser inserido no projeto conceitual de SMMA e carrega consigo aspectos essenciais ao projeto integrado (físico e de controle) proposto neste trabalho.

Visando à integração do projeto físico e de controle, outro ponto essencial é em relação a como deve ser tratado o aspecto comportamental do sistema em projeto durante a fase de concepção. A questão é como inserir na descrição funcional a perspectiva comportamental mencionada anteriormente. Seguindo o conceito apresentado em DE NEGRI (1996), modelos comportamentais são compreendidos como tendo uma semântica dinâmica, ou seja, descrevem as mudanças de estado e saída que ocorrem ao longo do tempo. Modelos comportamentais podem ser divididos em modelos transformativos e reativos. Os primeiros, também denominados a estado contínuo, descrevem o sistema através de equações elementares, sendo estas definidas para todo o tempo (equações diferenciais) ou definidas em pontos discretos do tempo (equações de diferenças) (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999). Exemplos de tais modelos incluem funções de transferência e a descrição por variáveis de estado, enquadrados na teoria de controle.

Por sua vez, os modelos reativos ou a estado discreto (dirigidos pelo tempo ou dirigidos a eventos), representam os possíveis estados que o sistema pode assumir, sendo a mudança de estado e as saídas produzidas pelo sistema decorrentes da combinação lógica de entradas (eventos e condições) e do estado em que o sistema encontra-se. Exemplos de tais modelos incluem a rede de Petri e Autômatos. Estes mostram explicitamente a seqüência com que ocorrem os estados e saídas sem, normalmente, estabelecer uma relação direta com o tempo. A classe de sistemas tratada no presente trabalho (SEDs) é caracterizada como um sistema reativo, podendo ser modelada pelos modelos citados.

Reportando-se aos modelos oriundos da UML (RUMBAUGH et al., 1999) utilizados por SHAKERI (1998) e DE NEGRI e PAES (2003), que tratam aspectos comportamentais (por exemplo, diagramas de seqüência), BONFE et al. (2002) ressaltam que, de maneira geral, os diagramas ligados a UML são mais orientados à especificação das interfaces de operação dos diversos objetos que compõem determinado sistema. Segundo os autores, este tipo de especificação é mais comum em engenharia de software, sendo portanto de difícil representação das interfaces ou especificações baseadas em eventos.

Nesse sentido, diversos modelos tratam de forma mais adequada sistemas caracterizados e definidos como guiados a eventos. Dentre os modelos citados anteriormente, dois merecem atenção: as Redes de Petri Controladas (temporizadas ou não) e os modelos de RAMADGE e WONHAM (1989) (temporizados ou não), baseados na Teoria de Autômatos e/ou Linguagens. Diferentemente dos outros modelos, que, enfatizam a análise de sistemas além de construir os controladores através de ajustes (ver figura 2.20), os dois modelos citados são dotados de procedimentos de síntese de controladores. Estes modelos, por esta característica, têm dado forte contribuição ao desenvolvimento da teoria de controle de SEDs.

Dessa forma, para alcançar o objetivo essencial do presente trabalho, propõe-se utilizar a rede C/A como modelo funcional e estrutural suplementada com o modelo comportamental baseado em linguagens controláveis (RAMADGE e WONHAM, 1989). Procurar-se-á, desta forma, trabalhar com modelos que contemplem as três perspectivas citadas e também que este modelo alcance os requisitos de um projeto integrado, ou seja, que esta atividade seja conduzida em torno de um modelo central de fácil entendimento. Com isso é possível alcançar uma meta importante, que é a execução de projetos conceituais (físico e controle) de maneira concorrente.

Para lidar com a abordagem comportamental, inserindo-a de modo adequado em conjunto com a rede C/A na descrição funcional, será apresentada no próximo capítulo a teoria que trata da modelagem e controle de sistemas a eventos discretos baseada em linguagens controláveis.

### 3. MODELAGEM E CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

A evolução tecnológica tem produzido sistemas com a finalidade de executar tarefas que, seja pela importância que adquirem em seu contexto, seja por sua complexidade e custo, justificam o esforço despendido na sua otimização e automação. Estes sistemas estão presentes em uma série de aplicações, incluindo a automação da manufatura, a robótica, a supervisão de tráfego, a logística (canalização e armazenamento de produtos, organização e prestação de serviços), sistemas operacionais, redes de comunicação de computadores, concepção de software, gerenciamento de base de dados e otimização de processos distribuídos (CURY, 2001).

Tais sistemas têm em comum a maneira pela qual percebem as ocorrências no ambiente a sua volta, o que se dá pela recepção de estímulos, denominados eventos. Estes eventos são, por sua natureza, considerados instantâneos, o que lhes confere um caráter de estados discretos no tempo. Sistemas com estas características são denominados Sistemas a Eventos Discretos (SEDs), em oposição ao sistema de variáveis contínuas, tratados pela teoria de controle clássica (CURY, 2001). De acordo com CASSANDRAS e LAFORTUNE (1999), quando o espaço de estados de um sistema é naturalmente descrito por um conjunto discreto e transições de estado são somente observadas em pontos discretos no tempo, associa-se essas transições a eventos e denomina-se tal sistema como a eventos discretos. Dessa forma, a ocorrência de eventos discretos gerados assincronamente define transição instantânea de estado.

Nesse contexto, a teoria de controle de sistemas a eventos discretos proposta por RAMADGE e WONHAM (1989) se destaca por sua larga aplicabilidade nos sistemas modernos e pelo seu potencial para desenvolvimento de ferramentas teóricas. Dessa forma, o presente capítulo tem como um dos objetivos apresentar os fundamentos da teoria de controle de SEDs, introduzida por RAMADGE e WONHAM (1989). Apresenta ainda extensões desta teoria, especificamente a proposta por QUEIROZ e CURY (2000a,b), que aborda o problema de modelagem e controle de forma modular.

Dentro dos objetivos da tese, a teoria aqui tratada serve como uma ferramenta de modelagem e síntese de controladores de SEDs que é acoplada à etapa de descrição funcional de SMMAs, inserindo assim a perspectiva comportamental do sistema em projeto. Os modelos aqui apresentados servem para representar o comportamento das agências e as especificações operacionais, estas tendo como significado os efeitos esperados nos canais de interligação (portas de saídas) de forma que a função do sistema seja alcançada.

### 3.1 Definição e características

Os Sistemas a Eventos Discretos (SEDs) percebem as ocorrências no mundo externo através da recepção de estímulos, denominados eventos. O “evento” é um conceito primitivo, cuja compreensão deve ser deixada à intuição, mais do que uma exata definição. Porém, não se pode deixar de enfatizar que um evento deve ser pensado como de ocorrência instantânea e como causador de uma transição no valor (discreto) do estado do sistema. São exemplos de eventos o início e o término de uma tarefa (mas não sua execução), a chegada de um cliente numa fila, a recepção de uma mensagem em um sistema de comunicação, um sinal de chegada de uma peça num processo industrial ou ainda o aperto de um botão pelo operador de uma máquina.

A ocorrência de um evento causa, em geral, uma mudança interna no sistema, a qual pode ser causada pela ocorrência de um evento interno ao próprio sistema, tal como o término de uma atividade ou o fim de uma temporização. Em qualquer caso, essas mudanças se caracterizam por serem abruptas e instantâneas: ao perceber um evento, o sistema reage imediatamente, acomodando-se em tempo nulo numa nova situação, onde permanece até que ocorra um novo evento. Desta forma, a simples passagem do tempo não é suficiente para garantir que o sistema evolua. Ainda, a ocorrência destes eventos pode depender de fatores alheios ao sistema, de modo que este não tem, em geral, como prevê-los (CURY, 2001).

Diz-se que, entre a ocorrência de dois eventos consecutivos, o sistema permanece num determinado estado. A ocorrência de um evento causa então uma transição ou mudança de estado no sistema, de forma que sua evolução no tempo pode ser representada pela trajetória percorrida no seu espaço de estados. Considere como exemplo um elevador que se move entre o térreo (0), primeiro andar (1) e segundo andar (2) e executa somente dois tipos de movimentos: subir e descer. Supõe-se ainda que o elevador esteja inicialmente no térreo, e a seqüência de movimentos é representada na figura 3.1 (KUMAR e GARG, 1995).

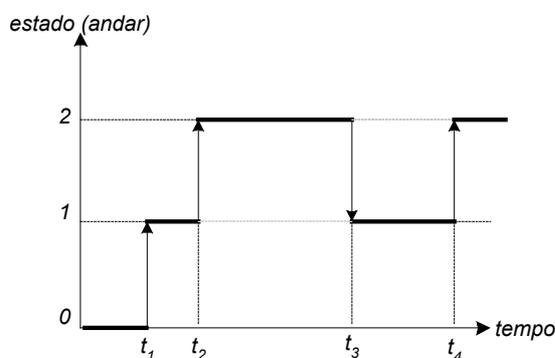


Figura 3.1 – Evolução típica de um Sistema a Eventos Discretos.

Na figura 3.1, observa-se que o elevador tem três estados - 0, 1 e 2 - e na sua trajetória ocorrem dois eventos: 'subir' e 'descer'. Vê-se que um mesmo evento pode ter efeitos diferentes, dependendo do estado em que ocorre. Por exemplo, se o sistema está no estado 0 e ocorre o evento subir, o próximo estado será 1; se o evento subir ocorre em 1, o próximo estado será 2. A trajetória pode continuar indefinidamente, inclusive com a ocorrência de novos eventos ou estados.

Nos sistemas tratados, assume-se que o número total de eventos diferentes que podem ocorrer é finito. Em relação ao número de estados, pode ser ilimitado no caso geral, embora a classe de sistemas com um número finito de estados seja um caso particular importante (CURY, 2001).

O espaço de estados de um SED é limitado a um conjunto enumerável e, diferentemente dos sistemas físicos, pode ter valores simbólicos em vez de valores reais; por exemplo, uma máquina está inativa, trabalhando ou quebrada, um elevador está no térreo, primeiro ou segundo andar. Ainda, eventos (causam transições de estados) ocorrem assincronamente em instantes discretos do tempo, sendo caracterizados ou rotulados também por valores simbólicos. Desta forma, as relações entre transições de estados e eventos são irregulares e normalmente não podem ser descritas usando equações diferenciais ou de diferença, como ocorre em muitos sistemas físicos (KUMAR e GARG 1995).

Os sistemas físicos descritos por equações diferenciais são denominados sistemas dinâmicos a variáveis contínuas. Estes, em geral, mudam de estado de forma contínua, tendo o seu comportamento descrito por uma função que relaciona o estado (variável dependente) ao tempo (variável independente). Assim, tais sistemas contrastam com os SEDs, já que se caracterizam pela continuidade das variáveis de estado e cujo mecanismo de transição é dirigido pelo tempo. Ao contrário destes sistemas, os SEDs podem permanecer um tempo arbitrário em um mesmo estado, sendo que sua trajetória pode ser dada por uma sequência de eventos na forma  $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots\}$ , incluindo eventualmente os instantes de tempo em que tais eventos ocorrem  $\{(\sigma_1, t_1), (\sigma_2, t_2), \dots\}$ . A quantidade de informação necessária depende dos objetivos da aplicação (CURY, 2001).

A figura 3.2, extraída de CASSANDRAS e LAFORTUNE (1999) ilustra as características que distinguem os sistemas a variáveis contínuas (SVCs) dos sistemas a eventos discretos (SEDs). Para os SVCs, o espaço de estados é o conjunto dos números reais e  $x(t)$  poderá assumir qualquer valor deste conjunto. Também, a função  $x(t)$  é a solução de uma equação diferencial na forma geral  $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$ , onde  $u(t)$  é a entrada. No caso de SEDs, o espaço de estados é o conjunto discreto  $X = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$ . A evolução do sistema se dá pela mudança de um estado a outro sempre que um evento ocorre. Observa-se que a ocorrência de um evento não significa necessariamente uma transição de estado, como o caso do evento  $e_3$ . Nota-se então que não existe nenhum mecanismo que especifica como eventos interagem com o tempo ou como o tempo de ocorrência pode ser determinado (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999).

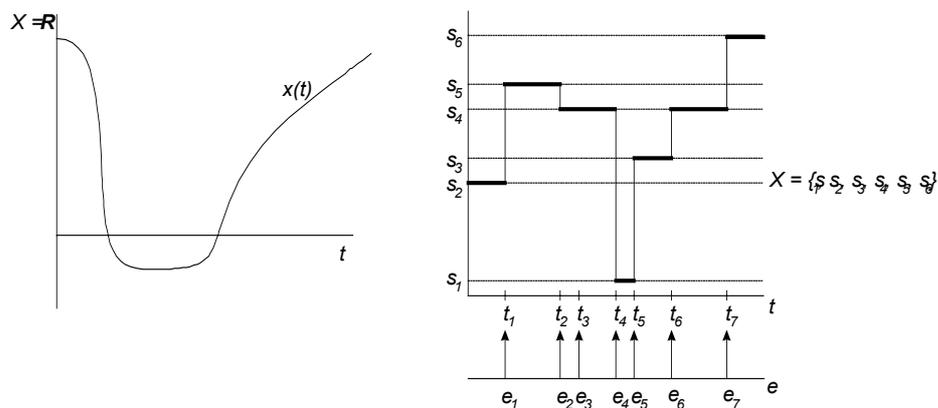
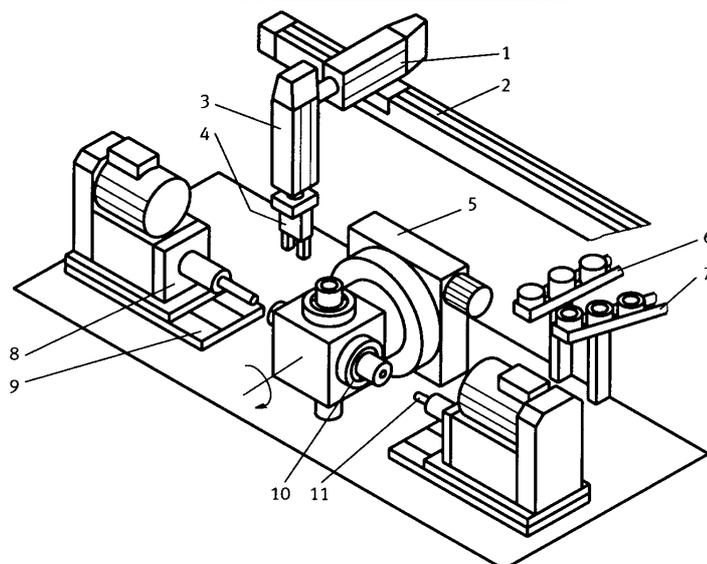


Figura 3.2 – Sistemas a Variáveis Contínuas e Sistemas a Eventos Discretos.

### 3.2 Exemplo de sistema a eventos discretos e a problemática de controle

A furação, o escareamento e a execução de chanfros de pequenas peças em médios e grandes lotes são operações típicas de trabalho em engenharia mecânica. Estas operações são executadas por uma unidade (um pequeno SMMA) ilustrada na figura 3.3, que é comandada por um controlador lógico programável (CLP) que garante o escareamento e a execução do chanfro de acordo com a seqüência de passos a seguir:

1. o módulo linear 1 captura a peça bruta do depósito de entrada 6 e a coloca na mesa giratória 5;
2. a mesa gira  $90^\circ$  (sentido horário);
3. a unidade de processamento realiza com a ferramenta 11 a primeira atividade (furação e escareamento);
4. a mesa gira  $90^\circ$ ;
5. a mesa gira  $90^\circ$  (ou  $180^\circ$ );
6. a unidade 8 realiza o chanfro;
7. a mesa gira  $90^\circ$ ;
8. a unidade linear 1 captura a peça acabada e a coloca no depósito de saída 7.



1.Módulo linear; 2.Cilindro pneumático sem haste; 3.Unidade vertical; 4.Garra; 5.Mesa giratória; 6.Alimentador de peças brutas; 7.Depósito de peças acabadas; 8.Unidade de usinagem; 9.Unidade de avanço linear; 10.Castanha; 11.Ferramenta.

Figura 3.3 – Unidade de furação, escareamento e execução de chanfro (FESTO, 2000).

A mesa giratória pneumática pode ser projetada para operar seqüencialmente de forma a permitir apenas uma peça por vez na unidade, ou seja, o módulo linear só poderá retirar uma peça bruta após colocar uma peça acabada no depósito de saída. Esta restrição na lógica de controle evita os problemas que podem ocorrer na operação de múltiplas peças em paralelo. Entretanto, este modo de funcionamento é muito pouco eficiente, visto que as unidades envolvidas na furação, escareamento e chanfro e na movimentação linear passam a maior parte do tempo ociosas enquanto poderiam estar operando em paralelo.

Pode-se, inicialmente, identificar os eventos relevantes para a implementação do programa de controle, que servirão como sinais de entrada e saída do CLP:

- comando que inicia um giro de 90° da mesa;
- sinal de final de operação da mesa (a mesa alcança 90° de giro);
- sinal de comando da unidade que realiza a furação e o escareamento;
- sinal de final de operação da unidade que realiza a furação e o escareamento;
- sinal de comando da unidade que realiza o chanfro;
- sinal de final de operação da unidade que realiza o chanfro;
- sinal de início de operação de movimentação linear para retirada da peça bruta do alimentador

6;

- sinal de final de operação de movimentação linear (a peça bruta é depositada na mesa giratória);
- sinal de início de operação de movimentação linear para retirada da peça acabada na mesa giratória;
- sinal de final de operação de movimentação linear (a peça bruta é colocada no depósito de saída 7).

A coordenação da unidade que realiza a furação deverá levar em conta algumas restrições que, por sua vez, devem ser obedecidas pelo programa de controle:

1. não operar a unidade que realiza a furação e escareamento, a que realiza o chanfro ou a unidade de movimentação linear enquanto a mesa estiver girando;
2. não sobrepor peças na posição da mesa correspondente a entrada e saída de peças;
3. não girar a mesa sem que as peças tenham sido furadas, escareadas e chanfradas ou retiradas, respectivamente;
4. não furar e escarear, chanfrar ou acionar o módulo linear para retirada de peças sem peças nas respectivas posições;
5. não furar e escarear ou chanfrar duas vezes a mesma peça;
6. não girar a mesa à toa, ou seja, sem peça em alguma das posições.

O problema de controle que surge pode ser especificado como segue:

‘Seja uma planta de processamento de peças, composta de um módulo linear, uma mesa giratória pneumática, uma unidade que realiza a furação e escareamento e uma unidade que realiza a chanfragem; projetar uma lógica de controle a ser implementada no CLP, de modo a permitir à mesa pneumática operar até quatro peças em paralelo, garantindo que o comportamento do sistema controlado obedeça às restrições de funcionamento do sistema, de forma a evitar os problemas que podem ocorrer na operação de múltiplas peças em paralelo, restringindo o sistema somente o necessário, e garantindo uma produção continuada de peças acabadas’.

De acordo com CASSANDRAS e LAFORTUNE (1999), existem três níveis de abstração na qual os SEDs são modelados e estudados: não temporizados (ou lógico), temporizado e estocástico, sendo que a escolha do nível apropriado de aplicação depende dos objetivos da análise. No presente trabalho, estar-se-á interessado no comportamento lógico do sistema, ou seja, em garantir que uma ordem precisa de eventos ocorra de forma a satisfazer um dado conjunto de especificações ou buscar um determinado estado (ou conjunto de estados) do sistema que pode ou não ser alcançado. Assim, a temporização do evento não é necessária e é suficiente modelar somente o comportamento não temporizado do sistema.

Ainda, CASSANDRAS e LAFORTUNE (1999) apontam para a necessidade de utilização de formalismos de modelagem que representem a estrutura de informações do comportamento do sistema e que seja conveniente para a análise e síntese de controladores. Nesse sentido, o presente

trabalho utiliza a teoria de controle de SEDs proposta por RAMADGE e WONHAM (1989), que por sua vez é baseada no formalismo denominado Linguagens e Autômatos.

No contexto do presente trabalho, diferentemente da situação descrita a partir da figura 3.3, pressupõe-se que a planta física não estará construída, ao contrário, estará também na fase de projeto. De qualquer forma, utilizando como modelo central de descrição funcional a rede C/A, inserem-se os modelos apresentados no presente capítulo de forma que seja estabelecido o comportamento das agências ainda que estas não tenham associados princípios de solução. Por sua vez, serão estabelecidas especificações sobre os canais de interligação destas agências utilizando também os modelos aqui apresentados.

### 3.3 Linguagens e autômatos como modelos para SEDs

Nesta seção apresentam-se os conceitos básicos da teoria de linguagens e autômatos, modelos estes requeridos no entendimento da teoria de controle de SEDs introduzida por RAMADGE e WONHAM (1989). Para maior detalhamento dos assuntos tratados nesta seção, o leitor poderá consultar CARROL e LONG (1989), HOPCROFT e ULLMANN (1979), ZILLER (1993) ou CASSANDRAS e LAFORTUNE (1999), onde encontrará a origem do material apresentado.

Conforme discutido nas seções anteriores, um SED tem associado um conjunto de eventos, que por sua vez formam seqüências que descrevem o seu comportamento. Uma seqüência então especifica a ordem em que vários eventos ocorrem sobre o tempo, mas sem prover os instantes associados com suas ocorrências. Então, a palavra ‘*linguagem*’ vem do fato que se pode pensar num conjunto de eventos como um ‘*alfabeto*’ e seqüências de eventos como ‘*palavras*’ (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999). A seguir as definições são apresentadas de maneira formal.

Seja um conjunto finito, não vazio, de símbolos distintos denominado alfabeto  $\Sigma$ . De forma análoga à escrita habitual, a justaposição de símbolos de um alfabeto é denominada *palavra* ou *cadeia*. O conjunto de todas as palavras finitas compostas com elementos de  $\Sigma$  é denotado  $\Sigma^*$ , incluindo a cadeia nula, denotada por  $\varepsilon$ . Define-se uma linguagem  $L$  sobre o alfabeto  $\Sigma$  como sendo um subconjunto de  $\Sigma^*$ . Segundo esta definição, tanto  $\Sigma^*$  quanto  $\emptyset$  são linguagens. Note que a linguagem vazia,  $\emptyset = \{\}$ , é diferente da linguagem formada apenas pela palavra nula  $\varepsilon$ .

O prefixo de uma cadeia  $w$  sobre um alfabeto  $\Sigma$  é qualquer cadeia  $u \in \Sigma^*$  que possa ser completada com outra cadeia  $v \in \Sigma^*$  para formar a cadeia  $w$ . Denota-se  $u \leq w$ ,  $u$  prefixo de  $w$ . O prefixo fechamento de uma linguagem  $L$  é dado por  $\bar{L} = \{u : \exists v \in \Sigma^* \wedge uv \in L\}$ . Em palavras,  $\bar{L}$  consiste de todas as cadeias de  $\Sigma^*$  que são prefixos de  $L$ . Em geral,  $L \subseteq \bar{L}$ . A linguagem  $L$  é dita

prefixo fechada se  $L = \overline{L}$ , ou seja, uma linguagem  $L$  é prefixo fechada se qualquer prefixo de  $L$  é também uma cadeia de  $L$ .

Considerando a evolução seqüencial de um SED e um alfabeto  $\Sigma$  correspondendo ao conjunto de eventos que afetam o sistema, pode-se afirmar que se um dado sistema produziu uma cadeia qualquer  $w$ , então produziu anteriormente todos os seus prefixos. Portanto, o comportamento lógico de qualquer sistema a eventos discretos em que não ocorram eventos simultâneos, pode ser representado por uma linguagem prefixo fechada.

O comportamento de um sistema a eventos discretos pode ser descrito através de um par de linguagens. A evolução seqüencial do SED, ou seu comportamento lógico, pode então ser modelado através de uma dupla  $D = (L, Lm)$ , onde  $L \subseteq \Sigma^*$  é a linguagem prefixo fechada que descreve o comportamento gerado pelo sistema, ou seja, o conjunto de todas as cadeias de eventos fisicamente possíveis de ocorrerem no sistema. Após partir do estado inicial e percorrer uma determinada trajetória em seu espaço de estados, um SED acabará, via de regra, completando uma ou mais tarefas. As seqüências de eventos que levam a tarefas completas formam também uma linguagem. Assim, no modelo  $D$ ,  $Lm \subseteq L$  é a linguagem que descreve o comportamento marcado do sistema, ou seja, o conjunto de cadeias em  $L$  que correspondem a tarefas completas que o sistema pode realizar.

Se  $L$  é a linguagem gerada de um sistema e  $Lm$  sua linguagem marcada, observa-se que, para gerar qualquer palavra da linguagem marcada, o SED em questão tem que gerar todos os seus prefixos. Em outras palavras, um SED que produza as palavras contidas numa linguagem  $Lm$ , também produzirá as palavras em  $L$ . Então,

$$Lm \subseteq \overline{Lm} \subseteq L = \overline{L}$$

As observações acima podem ser sintetizadas formalmente nas seguintes propriedades de linguagens  $L$  e  $Lm$  que representam um SED:

1.  $L \supset Lm$ , ou seja, o comportamento gerado contém o comportamento marcado de um SED;
2.  $L = \overline{L}$ , ou seja, o comportamento gerado de um SED é prefixo fechado.

A descrição de uma linguagem feita pela enumeração das cadeias que a definem, pode ser uma tarefa com pouca aplicabilidade. É conveniente dispor de uma forma de representação de linguagens que seja simples, concisa, clara e sem ambigüidade. É necessário então utilizar estruturas compactas que possam representar estas linguagens. No presente trabalho serão apresentadas duas estruturas: as expressões regulares e os autômatos.

As expressões regulares são seqüências de símbolos obtidas pela aplicação repetitiva de um conjunto de regras de formação. Para um alfabeto  $\Sigma$  dado, define-se recursivamente uma expressão regular da seguinte forma:

1. (a)  $\emptyset$  é uma expressão regular que representa a linguagem vazia;

- (b)  $\varepsilon$  é uma expressão regular denotando a linguagem formada pela palavra vazia  $\{\varepsilon\}$ ;  
 (c)  $u$  é uma expressão regular representando a linguagem  $\{u\} \subset \Sigma^*$ , para todo  $u \in \Sigma$ ;
- Se  $r$  e  $s$  são expressões regulares, então  $rs$ ,  $(r + s)$ ,  $r^*$  e  $s^*$  são expressões regulares;
  - Toda expressão regular é obtida pela aplicação das regras 1 e 2 um número finito de vezes.

A classe de linguagens expressa pelas chamadas expressões regulares são denominadas linguagens regulares. Por sua vez, tal classe pode ser representada por autômatos finitos determinísticos. Expressões regulares e autômatos finitos têm o mesmo poder de representação, e modelam as linguagens regulares com a mesma expressividade. Autômatos são modelos matemáticos que reconhecem um conjunto de cadeias sobre um dado alfabeto (CARROL e LONG, 1989).

Um autômato finito determinístico é uma quintupla  $A = (\Sigma, Q, \delta, q_0, Q_m)$ , onde  $\Sigma$  é um alfabeto,  $Q$  é um conjunto finito não vazio de estados,  $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$  é uma função de transição de estados,  $q_0 \in Q$  é o estado inicial,  $Q_m \subseteq Q$  é o conjunto de estados marcados. Formalmente a função de transição é definida sobre todo o domínio de  $Q \times \Sigma$ , mas considera-se que a função de transição é possivelmente parcial, ou seja, não há a necessidade da função ser definida para todo elemento de  $\Sigma$  em cada estado de  $Q$  (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999).

Os autômatos podem ser ilustrados por diagramas de transição de estados, que são grafos direcionados onde os nós representam os estados e os ramos representam os eventos. Nesses diagramas, os estados marcados são caracterizados por nós desenhados com linhas duplas e o estado inicial é identificado por uma seta. A figura 3.4 a seguir mostra um exemplo de autômato.

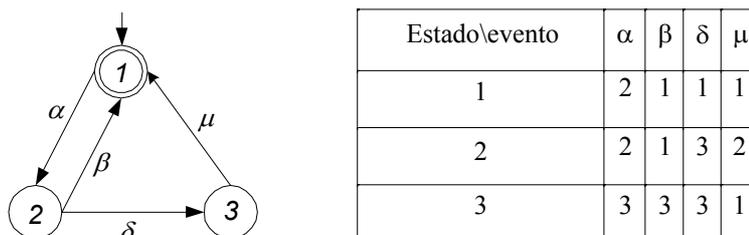


Figura 3.4 – Exemplo de autômato com tabela de transição de estados correspondente.

Dado um autômato  $A$ , define-se o conjunto ativo de eventos num estado  $q \in Q$  como  $\Sigma_A(q) = \{\sigma \in \Sigma : \delta(q, \sigma) \text{ é definida}\}$ . O autômato  $A$  pode ser visto como um dispositivo que opera como segue. Inicia a partir do estado inicial  $q_0$  e lá permanece até a ocorrência de um evento  $\sigma \in \Sigma_A(q_0) \subseteq \Sigma$  que dispara a transição  $\delta(q_0, \sigma) \in Q$ . Este processo continua baseado nas transições definidas em  $\delta$ .

A função de transição  $\delta$  pode ser naturalmente estendida para cadeias de eventos. Assim, a função de transição estendida denotada por  $\hat{\delta}$ , é uma função  $Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$  tal que,  $\hat{\delta}(q, \varepsilon) = q$ ,  $\hat{\delta}(q, \sigma) = \delta(q, \sigma)$  e  $\hat{\delta}(q, s\sigma) = \delta(\hat{\delta}(q, s), \sigma)$  para  $s \in \Sigma^*$  e  $\sigma \in \Sigma$ .

Um autômato  $G$  está associado a duas linguagens, a linguagem gerada  $L(G)$  e a linguagem marcada  $Lm(G)$ . A linguagem gerada por  $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$  é:

$$L(G) := \{s \in \Sigma^* : \delta(q_0, s) \text{ é definida}\}.$$

A linguagem marcada de  $G$  é:

$$Lm(G) := \{s \in \Sigma^* : \delta(q_0, s) \in Q_m\}.$$

Em palavras, a linguagem  $L(G)$  representa todas as cadeias que podem ser geradas no autômato, partindo do estado inicial. A linguagem  $Lm(G)$  considera todas as cadeias que partindo do estado inicial chegam a um estado marcado. Desta forma, um SED pode ser modelado por um autômato  $G$ , em que  $L(G)$  é o comportamento gerado pelo sistema e  $Lm(G)$  é o comportamento marcado ou conjunto de tarefas completas do sistema.

É possível definir um autômato com estados inacessíveis, isto é, estados que jamais podem ser alcançados a partir do estado inicial. Tais estados formam ‘ilhas’ que não são ligadas ao estado inicial por nenhum caminho. Formalmente, um estado  $q \in Q$  é acessível se  $q = \delta(q_0, u)$  para algum  $u \in \Sigma^*$ . Um autômato  $G$  é dito ser acessível se  $q$  é acessível para todo  $q \in Q$ . A componente acessível,  $G_{ac}$ , de um autômato  $G$  é obtida pela eliminação de seus estados não acessíveis e das transições associadas a eles.

Por outro lado  $G$  é dito ser coacessível, ou não bloqueante, se cada cadeia  $u \in L(G)$  pode ser completada por algum  $w \in \Sigma^*$  tal que  $uw \in Lm(G)$ , ou seja, se cada cadeia  $u \in L(G)$  for um prefixo de uma cadeia em  $Lm(G)$ . Esta definição diz que um autômato é coacessível se, a partir de qualquer um dos seus estados, existir ao menos um caminho que leve a um estado marcado. A condição de co-acessibilidade de um autômato pode ainda ser descrita pela equação:

$$L(G) = \overline{L_m(G)} \tag{3.1}$$

A equação acima permite definir a idéia de ausência de bloqueio num sistema a eventos discretos.

Um SED com comportamento  $L(G)$  e  $Lm(G)$  é dito ser não bloqueante se, e somente se, satisfaz as condições da equação 3.1. A condição de bloqueio ( $L(G) \neq \overline{L_m(G)}$ ) corresponde a existência de cadeia(s) geradas pelo sistema ( $u \in L(G)$ ), a partir da(s) qual(is) não se pode completar alguma tarefa no sistema ( $u \notin \overline{L_m(G)}$ ).

Os autômatos da figura 3.5 modelam um autômato não bloqueante e um bloqueante, respectivamente. No autômato a) a condição de SED não bloqueante é satisfeita ( $L(G) = \overline{L_m(G)}$ ),

ainda que após se atingir o estado 4 nenhum evento esteja habilitado. De fato, o estado 4 corresponde a uma tarefa completa do sistema, o que caracteriza o não bloqueio. No autômato b), três estados de bloqueio podem ser identificados (estados 3, 4 e 5), a partir dos quais não se pode completar nenhuma tarefa no sistema. Observe ainda que, a partir destes estados existem eventos possíveis de ocorrerem.

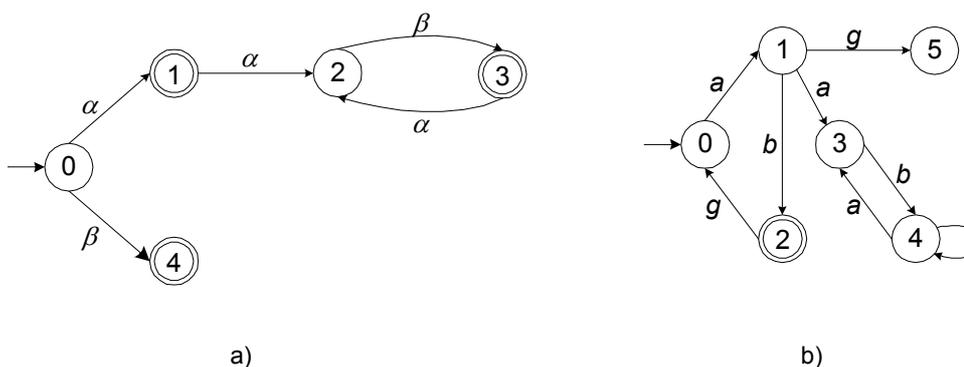


Figura 3.5 – Autômatos: a) não bloqueante e b) bloqueante.

Segundo CURY (2001), a modelagem de SEDs por autômatos pode ser abordada de duas formas: uma abordagem global e uma abordagem local. Na abordagem global o sistema é analisado como um todo e procura-se um autômato que represente todas as seqüências possíveis de eventos que ele pode gerar e tarefas que pode completar. Para sistemas de maior porte, esta pode ser uma tarefa de grande complexidade. Por outro lado, muitos sistemas de interesse prático apresentam características modulares e/ou distribuídas, de modo que podem ser vistos como constituídos de diversos subsistemas, cada qual gerando certos eventos. O comportamento do sistema como um todo é determinado então pelos eventos produzidos nesses subsistemas.

A abordagem local sugere maior facilidade na obtenção de modelos de sistemas de grande porte. Além disso, permite pressupor que alterações num subsistema ou em alguma restrição somente exigirão uma mudança no modelo específico correspondente.

A aplicabilidade da abordagem local para a modelagem de SEDs por autômatos é garantida pela operação de composição de autômatos, como definida a seguir.

Sejam dois autômatos  $G1 = (Q1, \Sigma1, \delta1, qo1, Qm1)$  e  $G2 = (Q2, \Sigma2, \delta2, qo2, Qm2)$ . A composição síncrona de  $G1$  e  $G2$ , denotada por  $G1 || G2$ , é definida como:

$$G1 || G2 = (Q1 \times Q2, \Sigma1 \cup \Sigma2, \delta1 || \delta2, (qo1, qo2), Qm1 \times Qm2)$$

onde:

$$\delta1 || \delta2 : (Q1 \times Q2) \times (\Sigma1 \cup \Sigma2) \rightarrow (Q1 \times Q2)$$

ou seja,

$$\begin{aligned}
 \delta_{1||2}((q1, q2), \sigma) &= (\delta_1(q1, \sigma), \delta_2(q2, \sigma)) && \text{se } \sigma \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2 \text{ e } \sigma \in \Sigma_1(q1) \cup \Sigma_2(q2) \\
 &= (\delta_1(q1, \sigma), q2) && \text{se } \sigma \in \Sigma_1 \text{ e } \sigma \notin \Sigma_2 \text{ e } \sigma \in \Sigma_1(q1) \\
 &= (q1, \delta_2(q2, \sigma)) && \text{se } \sigma \in \Sigma_2 \text{ e } \sigma \notin \Sigma_1 \text{ e } \sigma \in \Sigma_2(q2) \\
 &= \text{indefinida} && \text{caso contrário}
 \end{aligned}$$

Um evento comum a  $\Sigma_1$  e  $\Sigma_2$  só pode ser executado sincronamente nos dois autômatos; os demais ocorrem assincronamente, ou seja, de modo independente em cada autômato. Pode-se interpretar  $G1 || G2$  como a ação cooperativa entre os dois autômatos, onde os eventos comuns aos respectivos alfabetos são sincronizados. Se os alfabetos são iguais  $\Sigma_1 = \Sigma_2$ , a composição é completamente síncrona, isto é, todos os eventos estão sincronizados. No caso oposto,  $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ , não existe nenhuma sincronização entre os eventos dos dois autômatos.

A figura 3.6 mostra um autômato resultante da operação de composição dos dois autômatos (referidos como  $G1$  e  $G2$ ). O conjunto de eventos comuns é  $\{a, b\}$ ,  $G1$  tem somente um evento não comum aos dois alfabetos, o evento  $g$  e os estados de  $G1 || G2$  são denotados por pares. No estado inicial  $(x, 0)$ , o único evento comum possível é  $a$ , que leva ao estado  $(x, 1)$ , um estado marcado desde que  $x$  é marcado em  $G1$  e  $1$  é marcado em  $G2$ .

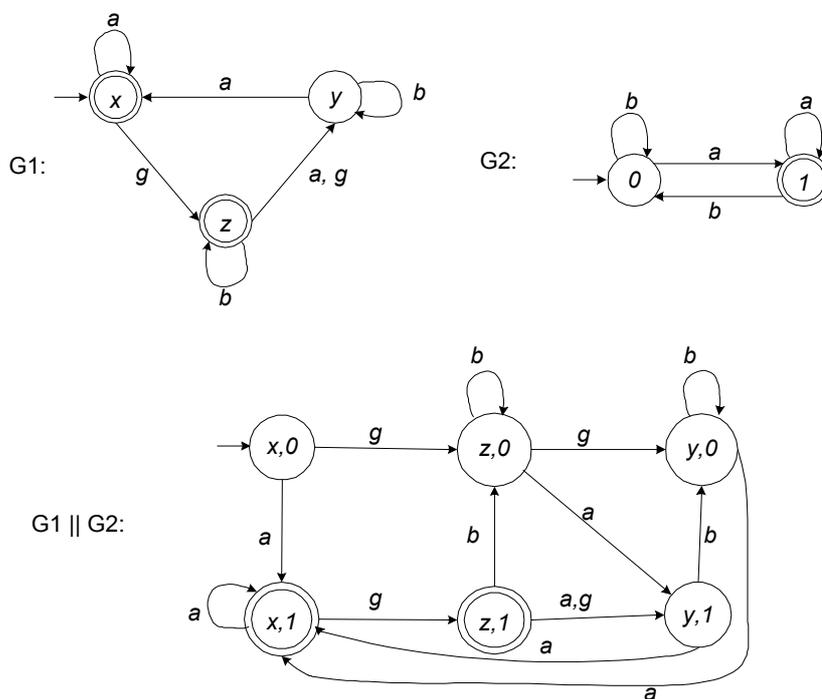


Figura 3.6 – Operação de composição de autômatos (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999)

### 3.4 Controle supervisorio de sistemas a eventos discretos

Esta seção apresenta a Teoria de Controle Supervisorio de Sistemas a Eventos Discretos, formulada inicialmente por RAMADGE e WONHAM (1989). Esta teoria tem sido desenvolvida nas últimas décadas como uma proposta de metodologia formal de síntese de controladores ótimos para SEDs, entre os quais se inclui grande parte dos sistemas de manipulação e montagem automatizados.

Na abordagem proposta por RAMADGE e WONHAM (1989) (abordagem RW), o SED a ser controlado, ou planta na terminologia de controle tradicional, é representado por uma linguagem gerada  $L$  (seqüências parciais) e por uma linguagem marcada  $Lm$  (tarefas completadas). Conforme discutido na seção anterior, assume-se aqui que a planta  $G$  é modelada por um autômato. A notação  $G$  será então usada indistintamente para referenciar a planta ou o seu modelo em autômato.

Dessa forma, as linguagens  $L(G)$  e  $Lm(G)$  podem conter cadeias indesejáveis de eventos por violarem alguma condição que se deseja impor ao sistema. Pela junção de uma estrutura de controle (supervisor), será possível modificar a linguagem gerada pelo sistema dentro de certos limites, evitando aquelas cadeias indesejadas de eventos. A característica de controle é introduzida ao se considerar que certos eventos podem ser desabilitados por um controlador externo. Assim, pode-se influenciar na evolução do SED pela proibição da ocorrência de eventos-chave em certos momentos.

O autômato  $G$  modela então o comportamento não controlado do SED, ou o comportamento em malha aberta analogamente à teoria de controle clássica. A premissa é que este comportamento não é satisfatório e deve ser modificado por uma ação de controle. A modificação deste comportamento deve ser entendida como uma restrição do comportamento a um subconjunto de  $L(G)$ . Para alterar o comportamento introduz-se um supervisor, denotado por  $S$ .

A idéia central é construir um supervisor tal que os eventos que ele desabilita num dado instante dependem do comportamento passado do SED. Refere-se a esta abordagem como controle supervisorio monolítico, pois o objetivo é projetar um único controlador cuja função é habilitar e desabilitar certos eventos, conforme a seqüência de eventos observados na planta.

Dentro desta abordagem, considera-se que o supervisor  $S$  interage com a planta  $G$ , numa estrutura em malha fechada, onde  $S$  observa os eventos ocorridos em  $G$  e define que eventos, dentre os fisicamente possíveis de ocorrerem no estado atual, são permitidos de ocorrerem a seguir. Sob este aspecto, a forma de controle é dita permissiva, no sentido que eventos inibidos não podem ocorrer e os autorizados não ocorrem obrigatoriamente. O conjunto de eventos habilitados num dado instante pelo supervisor define uma entrada de controle. Esta é atualizada a cada nova ocorrência de evento observada em  $G$ . A figura 3.7 a seguir ilustra o acoplamento entre a planta e o supervisor.

Estes conceitos levam à distinção do sistema a controlar (planta) e do agente de controle (supervisor), permitindo assim distinguir o comportamento fisicamente possível do sistema e as restrições ligadas a comportamentos não desejados.

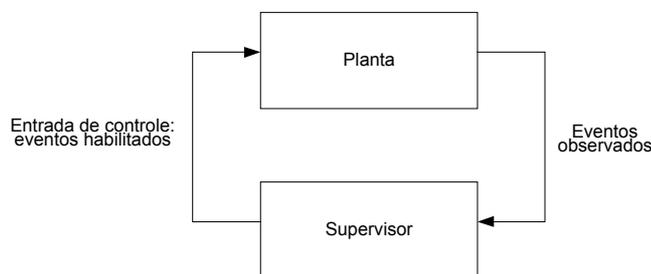


Figura 3.7 – Acoplamento da planta e supervisor no modelo RW (RAMADGE e WONHAM, 1989).

Para associar a um SED ou a uma planta  $G$  estruturas de controle, particiona-se o alfabeto  $\Sigma$  em um conjunto  $\Sigma_c$  de eventos controláveis que podem ser inibidos de ocorrer, e um conjunto  $\Sigma_u$  de eventos não controláveis, sobre os quais o agente de controle não tem influência. Para que seja possível interferir no funcionamento da planta  $G$ , este precisa ser dotado de uma interface através da qual se possa informar quais eventos devem ser habilitados e quais devem ser inibidos. Considera-se o conjunto de eventos que se deseja habilitar como uma entrada de controle. Naturalmente, esta entrada de controle não inibe eventos não controláveis. Formalmente define-se uma estrutura de controle associada a  $G$  como o conjunto de entradas de controle:

$$\Gamma = \{ \gamma \in 2^{\Sigma} : \gamma \supseteq \Sigma_u \}$$

onde a condição  $\gamma \supseteq \Sigma_u$  indica simplesmente que os eventos não controláveis são necessariamente habilitados.

Quando se aplica uma entrada de controle  $\gamma$  a uma planta, esta se comporta como se os eventos inibidos fossem momentaneamente apagados da sua estrutura de transição, afetando com isso a linguagem gerada. É este o princípio de funcionamento do mecanismo de controle adotado no modelo RW, que consiste em chavear as entradas de controle em resposta ao comportamento observado do sistema, de modo a confinar a linguagem gerada a uma dada especificação. Considera-se então que a função de transição de um autômato cujo alfabeto foi particionado em eventos controláveis e eventos não controláveis deixa de ser definida para os eventos inibidos por uma entrada de controle aplicada, enquanto esta estiver presente, sem explicitar este fato na notação.

O agente controlador é denominado supervisor. Formalmente, um supervisor  $f$  é um mapeamento  $f: L \rightarrow \Gamma$  que especifica, para cada cadeia possível de eventos gerados  $w \in L$ , um

conjunto de eventos habilitados (entrada de controle)  $\gamma = f(w) \in \Gamma$ . O SED  $G$  controlado por  $f$  é denotado por  $f/G$ . O comportamento do sistema sob a ação do supervisor, definido pela linguagem  $L(f/G) \subseteq L(G)$  satisfaz:  $i) \varepsilon \in L(f/G)$  e  $w\sigma \in L(f/G)$  sse  $w \in L(f/G)$ ,  $w\sigma \in L(G)$  e  $\sigma \in f(w)$ .

Diz-se que um supervisor  $f$  para a planta  $G$  é não bloqueante se, e somente se,  $\overline{L_m(f/G)} = L(f/G)$ . Isso implica que, de qualquer estado do comportamento em malha fechada da planta, uma tarefa pode ser completada no sistema.

Pode-se representar um supervisor por um autômato  $S$ , definido sobre o mesmo alfabeto  $\Sigma$ , cujas mudanças de estado são ditadas pela ocorrência de eventos na planta  $G$ . A ação de controle de  $S$ , definida para cada estado do autômato, é desabilitar em  $G$  os eventos que não possam ocorrer em  $S$  após uma cadeia de eventos observada. O supervisor  $S$  pode ser interpretado como um autômato que aceita como entrada os eventos gerados por  $G$  e executa transições de estado de acordo com sua função de transição.

O funcionamento do sistema controlado  $S/G$  pode ser descrito por um SED resultante da composição síncrona de  $S$  e  $G$ , isto é,  $S \parallel G$ . De fato, na composição síncrona  $S \parallel G$  somente as transições permitidas tanto no sistema controlado  $G$ , como no supervisor  $S$  podem ocorrer.

O comportamento em malha fechada do sistema é então dado por:

$$L(S/G) = L(S \parallel G) \text{ e } L_m(S/G) = L_m(S \parallel G).$$

De um modo geral, um problema de síntese de supervisores supõe que se represente o comportamento fisicamente possível do sistema e o comportamento desejado sob supervisão por linguagens, sendo o objetivo construir um supervisor para a planta de forma que o comportamento do sistema em malha fechada se limite ao comportamento desejado. Formalmente, o Problema de Controle Supervisório (PCS) é apresentado a seguir:

Dada uma planta  $G$ , com comportamento  $(L(G), L_m(G))$  e uma estrutura de controle  $\Gamma$  (conjunto de entradas de controle), definidos sobre o conjunto de eventos  $\Sigma$ ; e especificações definidas por  $A \subseteq E \subseteq \Sigma^*$ ; encontrar um supervisor não bloqueante  $S$  para  $G$  tal que

$$A \subseteq L_m(S/G) \subseteq E.$$

As especificações  $A$  e  $E$  definem limites inferior e superior para o comportamento do sistema em malha fechada.

As especificações são interpretadas da seguinte forma. A linguagem gerada  $L(G)$  contém palavras que não são aceitas, pois violam alguma condição que se deseja impor ao sistema. Pode ser certos estados de  $G$  que são indesejados e devem ser evitados, sendo estes estados causadores de bloqueio ou então fisicamente inadmissíveis, por exemplo, a colisão de um robô com um veículo auto guiado ou a tentativa de colocar uma peça num *buffer* cheio num sistema de manufatura automatizado. Ou ainda, algumas palavras em  $L(G)$  podem conter prefixos que não são permitidos, que violam uma seqüência desejada de certos eventos. Assim, consideram-se sub-

linguagens de  $L(G)$  que representam o comportamento ‘legal’ ou ‘admissível’ do sistema controlado (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999).

### 3.4.1 Condições para a existência de supervisores

As condições para a existência de supervisores são descritas usando as noções de *controlabilidade* e *Lm-fechamento*.

Dada uma planta  $G$  definida sobre o alfabeto  $\Sigma = \Sigma_u \cup \Sigma_c$  e uma sublinguagem  $K$  de  $L(G)$ , a linguagem  $K$  é dita *controlável* em relação a  $L(G)$  se  $\overline{K}\Sigma_u \cap L(G) \subseteq \overline{K}$ . Esta definição exige que qualquer prefixo  $w$  de uma palavra de  $K$  ( $w \in \overline{K}$ ), quando seguido de um evento não controlável  $\sigma \in \Sigma_u$ , tal que  $w\sigma \in L(G)$ , deve ser ainda prefixo de uma palavra de  $K$  ( $w\sigma \in \overline{K}$ ). A classe de linguagens controláveis contidas numa linguagem  $K$ , denotada por  $C(K) = \{E \subseteq K : \overline{E}\Sigma_u \cap L(G) \subseteq \overline{E}\}$ , é não vazia e fechada para a operação de união de conjuntos. Sendo assim,  $C(K)$  contém um único elemento supremo, chamado de  $\sup C(K, L(G))$ .

Diz-se que uma linguagem  $K$  é *Lm(G)-fechada*, se  $K = \overline{K} \cap L_m(G)$ , ou seja, todo prefixo de qualquer palavra de  $K$  que pertença a  $L_m(G)$  é também uma palavra de  $K$ .

A utilização da Teoria de Controle Supervisório proposta por RAMADGE e WONHAM (1989) depende de se determinar sob que condições existe um supervisor que realiza uma determinada especificação e, caso exista, como encontrá-lo. A proposição a seguir resume as condições necessárias e suficientes de existência de supervisores (WONHAM, 1999).

Proposição: Seja um autômato  $G$  e uma linguagem alvo  $K$ .

1. Para  $K \subseteq L_m(G)$ ,  $K \neq \emptyset$ , existe um supervisor não bloqueante  $f$  tal que  $L_m(f/G) = K$  se, e somente se,  $K$  é *Lm-fechada* e *L-controlável*.

2. Para  $K \subseteq L(G)$ ,  $K \neq \emptyset$ , existe um supervisor  $f$  tal que  $L(f/G) = K$  se, e somente se,  $K$  é *prefixo fechada* e *L-controlável*.

No caso em que a linguagem  $K$  que especifica o comportamento desejado não é controlável, é possível projetar uma aproximação de  $K$  que é a máxima linguagem contida em  $K$  (denotado por  $\uparrow K$ ). Além disso, sob certas condições, esta linguagem satisfaz os requisitos de fechamento impostos pela proposição estabelecida, e portanto as condições de um supervisor associado. Este supervisor é chamado supervisor minimamente restritivo ou ótimo (RAMADGE e WONHAM, 1989; KUMAR e GARG, 1995; WONHAM, 1999).

### 3.5 Controle modular local

A teoria de controle supervisorio proposta por RAMADGE e WONHAM (1989) possui a vantagem de permitir a síntese automática de supervisores e, também, a noção de máxima linguagem controlável garante a síntese de controladores de forma minimamente restritiva. No entanto, quando um grande número de tarefas deve ser executado pelo sistema de controle, a abordagem monolítica pode ter um desempenho computacional bastante desfavorável. Isso porque a composição síncrona das especificações gera um crescimento exponencial no número de estados do modelo e, por conseguinte, na complexidade computacional do problema.

Uma forma de diminuir a complexidade da síntese de controladores é dividir a tarefa de controle em várias sub-tarefas, que são resolvidas usando a teoria de controle segundo RAMADGE e WONHAM (1989), e combinar os sub-controladores resultantes de modo a solucionar o problema original. Esta concepção é chamada síntese modular e os controladores resultantes de supervisores modulares. Esta abordagem foi introduzida por WONHAM e RAMADGE (1988) e é referida como a teoria de controle modular.

A síntese modular permite, assim, que problemas complexos possam ser decompostos em módulos mais simples, de forma a atribuir maior flexibilidade ao controlador resultante. Além de ser mais facilmente construído, um supervisor modular costuma ser mais facilmente modificado, atualizado e corrigido. Por exemplo, se uma sub-tarefa for mudada, só é preciso reconstruir o subcontrolador correspondente ao invés de refazer todo o sistema supervisor.

Em contrapartida, os controladores modulares têm suas ações de controle baseadas numa versão parcial do estado de funcionamento do sistema global. Por conseguinte, a síntese modular é, em geral, degradada em relação à solução monolítica, podendo em muitos casos gerar conflitos na ação de controle. A chave para garantir o não bloqueio entre controladores é a propriedade de *modularidade*. Quando esta condição é verificada, o controle modular mostra-se bastante vantajoso em relação ao monolítico em termos da implementação da estrutura de controle e da complexidade do processo de síntese. O conceito de modularidade é apresentado a seguir:

Sejam duas linguagens  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$ . É sempre verdade que  $\overline{L_1 \cap L_2} \subseteq \overline{L_1} \cap \overline{L_2}$ , isto é, o prefixo de uma cadeia comum a  $L_1$  e  $L_2$  é também um prefixo de  $L_1$  e  $L_2$ . Diz-se que  $L_1$  e  $L_2$  são modulares (ou não conflitantes) se  $\overline{L_1 \cap L_2} = \overline{L_1} \cap \overline{L_2}$ . Isso quer dizer que duas linguagens são modulares se, toda vez que compartilham um prefixo, compartilham também uma palavra contendo este prefixo. Por exemplo, quaisquer linguagens prefixo fechadas são modulares entre si.

Quando a propriedade de modularidade entre as tarefas de controle é verificada, o controle modular mostra-se bastante vantajoso em relação ao monolítico em termos de implementação da estrutura de controle e da complexidade do processo de síntese. No entanto, a modelagem por autômatos pode induzir a uma explosão de estados à medida que subsistemas vão sendo agregados a ela. Apesar de cada supervisor ser concebido para uma especificação isolada, a abordagem considera que cada módulo de controle observa e controla a planta inteira. Dessa forma, o controle modular pode ser inviável para sistemas de grande porte.

QUEIROZ e CURY (2000a) (2000b) propõem uma solução alternativa para a síntese de controle modular que explora, além da modularidade das especificações, a modularidade da planta. A abordagem proposta pelos autores é denominada controle modular local, onde é proposta uma arquitetura distribuída em que cada módulo de controle atua somente sobre os subsistemas atingidos. Dessa forma, o controle modular proposto por QUEIROZ e CURY (2000a)(2000b) é uma abordagem adequada quando comparada ao controle monolítico e mesmo ao modular clássico, uma vez que permite uma redução da complexidade computacional tanto no processo de síntese quanto no funcionamento da estrutura de controle. É esta abordagem que é seguida no presente trabalho.

### **3.5.1 Modelagem de sistemas compostos**

Segundo QUEIROZ (2000), no projeto de sistemas de maior complexidade, a modelagem das diversas partes envolvidas é geralmente um passo intermediário na representação do comportamento conjunto do sistema. Isso porque a modelagem dessas partes exige menor esforço computacional, menos memória e costuma ser mais compreensível para o projetista.

Tais sistemas são normalmente modelados pela composição de subsistemas de menor porte, podendo estes subsistemas ser assíncronos entre si. Dessa forma, de acordo com o nível de composição das sub-plantas originalmente modeladas, diferentes representações para o sistema podem ser formuladas. Na abordagem de controle modular local, são utilizadas duas representações para o sistema: a representação por sistemas compostos (RSC) e a representação por sistemas produto (RSP) (RAMADAGE e WONHAM, 1989). A definição destas duas representações é dada a seguir.

Representação por Sistema Composto (RSC)

É qualquer modelagem da planta global  $G = (\Sigma, Q, \delta, q_0, Q_m)$  obtida pela combinação de subplantas  $G'_i = (\Sigma'_i, Q'_i, \delta'_i, q'_{0i}, Q'_{mi})$ ,  $i \in N' = \{1, \dots, n'\}$ . Assim, tem-se  $G = \parallel_{i=1}^{n'} G'_i$ , com alfabeto de eventos  $\Sigma = \bigcup_{i=1}^{n'} \Sigma'_i$ .

Representação por Sistema Produto (RSP)

Um Sistema Produto é um sistema que pode ser modelado pela composição de subsistemas completamente assíncronos entre si (RAMADGE e WONHAM, 1989; RAMADGE, 1989). Denomina-se Representação por Sistema Produto (RSP) qualquer RSC cujas subplantas não tenham eventos síncronos em comum.

Considerando que cada subsistema de uma RSP representa uma parte isolada de um sistema em malha aberta, pode-se afirmar que esta modelagem representa a estrutura descentralizada natural de operações concorrentes para sistema de maior porte. Pode-se obter a mais refinada Representação por Sistema Produto equivalente a uma RSC qualquer, pela composição dos geradores síncronos deste último. Para isso, faz-se a composição dos subsistemas síncronos originais (que têm eventos em comum), criando-se o maior número possível de subsistemas assíncronos, cada qual com o mínimo de estados (QUEIROZ, 2000).

As definições apresentadas a seguir fundamentam o controle modular local de sistemas compostos.

Considere a RSP de um sistema  $G$  formada por subsistemas  $G_i = (\Sigma_i, Q_i, \delta_i, q_{0i}, Q_{mi})$ ,  $i \in N = \{1, \dots, n\}$ . Para  $j = 1, \dots, m$ , sejam especificações genéricas modeladas por  $E_{xj}$  definidas respectivamente em  $\Sigma_{xj} \subseteq \Sigma$ . Para  $j = 1, \dots, m$ , a planta local  $G_{Xj} = (\Sigma_{Xj}, Q_{Xj}, \delta_{Xj}, q_{0Xj}, Q_{mXj})$  associada à especificação  $\Sigma_{xj}$  é definida por  $G_{Xj} = \parallel_{i \in N_{Xj}} G_i$ , com  $N_{Xj} = \{k \in N \mid \Sigma_k \cap \Sigma_{xj} \neq \emptyset\}$ .

Assim, a planta local  $G_{Xj}$  é composta apenas pelos subsistemas da modelagem original que estão diretamente (e indiretamente) restringidos por  $E_{xj}$ .

Exemplo: Seja uma RSC de um sistema formada pelo conjunto de subplantas  $\{G'_i = (\Sigma'_i, Q'_i, \delta'_i, q'_{0i}, Q'_{mi}), i = 1, \dots, 5\}$ . Sejam duas especificações genéricas  $E_a \subseteq \Sigma_a^*$  e  $E_b \subseteq \Sigma_b^*$ . A relação entre os conjuntos de eventos é ilustrada na figura 3.8.

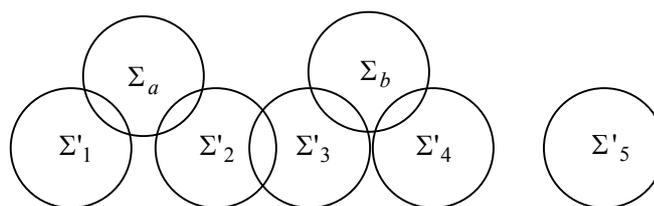


Figura 3.8 – Alfabeto de eventos de um sistema composto.

Esse sistema tem uma RSP mais refinada dada pelo conjunto de plantas assíncronas  $\{G_i = (\Sigma_i, Q_i, \delta_i, q_{0i}, Q_{mi}), i = 1, \dots, 4\}$ , onde  $G_1 = G'_1$ ,  $G_2 = G'_2 \parallel G'_3$ ,  $G_3 = G'_4$  e  $G_4 = G'_5$ . Assim, as plantas locais são dadas por  $G_A = G_1 \parallel G_2$  e  $G_B = G_2 \parallel G_3$ . Deste modo, podem ser calculadas as especificações locais  $E_A = E_a \parallel L_m(G_A)$  e  $E_B = E_b \parallel L_m(G_B)$ .

### 3.5.2 Modularidade local

Na abordagem proposta por QUEIROZ e CURY (2000a, b), um novo conceito de *modularidade* é apresentado:

• Diz-se que as linguagens  $E_A \subseteq \Sigma_A^*$  e  $E_B \subseteq \Sigma_B^*$  são localmente modulares se  $\overline{E_A \parallel E_B} = \overline{E_A} \parallel \overline{E_B}$ , ou seja, se  $\overline{P^{-1}_A(E_A) \cap P^{-1}_B(E_B)} = \overline{P^{-1}_A(E_A)} \parallel \overline{P^{-1}_B(E_B)}$ , onde P é a projeção e  $P^{-1}$  a projeção inversa (ZILLER, 1993).

O principal resultado da abordagem proposta por QUEIROZ e CURY (2000a)(2000b) é que, dadas duas especificações genéricas  $E_a$  e  $E_b$  sobre um sistema produto, é necessário apenas expressá-las em termos dos subsistemas  $G_A$  e  $G_B$  afetados por elas. Calculam-se assim as máximas linguagens controláveis contidas nas mesmas  $SupC(E_A, L_m(G_A))$  e  $SupC(E_B, L_m(G_B))$ , para as quais são gerados controladores locais correspondentes. A condição de modularidade local dessas duas linguagens garante que a ação conjunta dos supervisores locais resultantes é ótima, ou seja, não resulta em nenhuma perda de desempenho em relação ao controle descentralizado.

### 3.6 Implementação do controle modular local

No presente trabalho, estende-se o resultado obtido em QUEIROZ et al. (2001) e QUEIROZ e CURY (2002) de forma a sistematizar a implementação a outras formas de execução (além da implementação em linguagem escada). A metodologia agora apresentada é baseada no método passo a passo, conhecido também como “o método da cadeia seqüencial” (*Ablaufkette* na literatura

alemã) no contexto de sistemas pneumáticos para automação. Este método é descrito detalhadamente em BOLLMANN (1998). Algumas suposições e modificações serão apresentadas para a implementação do controle supervisorio.

### 3.6.1 Método passo a passo generalizado

O método passo a passo possibilita a concepção de sistemas de automação pneumática sem a pré-definição da tecnologia a ser utilizada no processamento de informações e permite desenvolver soluções com pneumática pura, eletropneumática e pneumática (uso de CLPs). O método é aplicável na fase conceitual do projeto, onde são feitas considerações sobre qual solução tecnológica é mais viável para o sistema a ser criado.

Assim, utilizando-se o método passo a passo, gera-se o diagrama funcional chegando-se também ao diagrama lógico. Posteriormente, faz-se a seleção da tecnologia comparando-se os requisitos de projeto como custo, ambiente de instalação, qualificação da equipe de manutenção, etc, com as características intrínsecas dos componentes pneumáticos, elétricos e eletrônicos disponíveis para automação. Segundo DE NEGRI (1997), comparando-se os diversos métodos de projeto, o método passo a passo mostra-se de fácil interpretação por especialistas de diversas áreas, sendo o diagrama funcional uma forma simples de representação do sistema controlado, deixando bem claro os passos a serem executados.

O método consiste em elaborar o diagrama funcional seqüencial desejado, definindo-se os seus passos e suas ações correspondentes. A norma IEC 848 unificou na nomenclatura “function chart” os procedimentos do diagrama Grafset da norma francesa e os do diagrama funcional – “Funktionsplan” – apresentado na edição original de 3/77 da norma alemã DIN 40719.

As principais características do método passo a passo são descritas a seguir (BOLLMANN, 1997):

- a cada passo do gráfico de funções (IEC 848) elaborado, associar uma memória RS (“Set-Reset”) do tipo desligar dominante;
- a ativação (“Set”) da memória produzirá um sinal de comando para a realização das ações do passo correspondente;
- as memórias são intertravadas, tal que ao se ativar a memória  $n$ , será desativada a memória  $n - 1$  e habilitada a memória  $n + 1$ , ou seja, a memória  $n + 1$  já estará recebendo um sinal que a coloca de “prontidão” para ser ativada”;
- para que ocorra a ativação de uma memória é necessário, além da habilitação, que seja também satisfeita uma condição lógica relacionando sinais externos de botões, sensores, fins de curso ou outros elementos de sinal;

A figura 3.9 a seguir representa a estrutura lógica básica de cada passo, mostrando sua correspondência direta com a representação usada no diagrama funcional, onde:

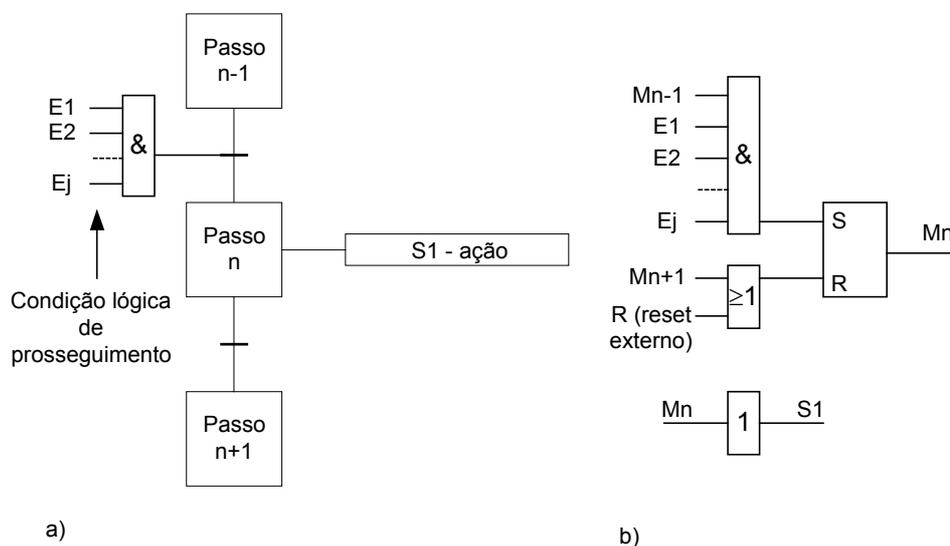


Figura 3.9 – a) Elementos principais do diagrama funcional (IEC 848); b) Diagrama lógico correspondente ao passo n.

- a variável de saída  $M_n$  existirá quando a memória RS for ativada, ou seja, quando há sinal oriundo da memória RS anterior,  $M_{n-1}$ , e o cumprimento de uma condição lógica de prosseguimento,  $E1, E2, \dots, Ej$ , exemplificada neste caso pela expressão booleana  $E1.E2...Ej$ ;
- a variável de saída  $M_n$  provocará as ações correspondentes ao passo n, habilitará a memória  $M_{n+1}$ , e desativará a memória  $M_{n-1}$ ;
- assim que a memória seguinte,  $M_{n+1}$ , for ativada, dar-se-á o desativamento da memória  $M_n$ ;
- o desativamento também poderá ocorrer por alguma variável externa,  $R$ , a qualquer momento, durante o tempo de atividade da memória  $M_n$ .

As saídas  $M_n$  poderão atuar diretamente nos atuadores externos ou através de relés de amplificação de potência. Quando se usam controladores lógicos programáveis (CLPs), a saída  $M_n$  poderá ser diretamente uma saída externa do CLP ou uma saída interna (*flag*, registro), que posteriormente se comunica com a saída externa do CLP.

A partir do diagrama lógico, elabora-se o projeto do dispositivo de execução física do sistema de controle. Nesse sentido, pode-se utilizar o diagrama de contatos para o uso do controlador lógico programável, o esquema elétrico para a eletropneumática tradicional e os circuitos pneumáticos com módulos sequenciais passo a passo.

Para a maioria, senão a totalidade dos CLPs, está disponível a programação por diagrama de contatos, a qual possibilita criar o programa estruturado previsto no diagrama funcional. A figura

3.10 exemplifica a forma existente para se representar a memória RS no diagrama de contatos. Usando-se o esquema da figura 3.9 para cada memória RS, obtém-se o diagrama de contatos que possibilita a programação do controlador.

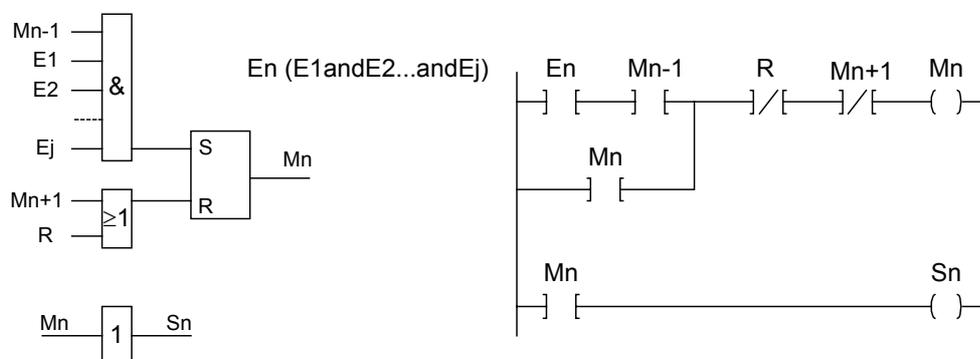


Figura 3.10 – Princípio de solução por programação correspondente à lógica dos passos.

A figura 3.11 ilustra a execução física da memória RS através da utilização de relés com auto-retenção, onde o módulo básico corresponde a cada passo da seqüência.

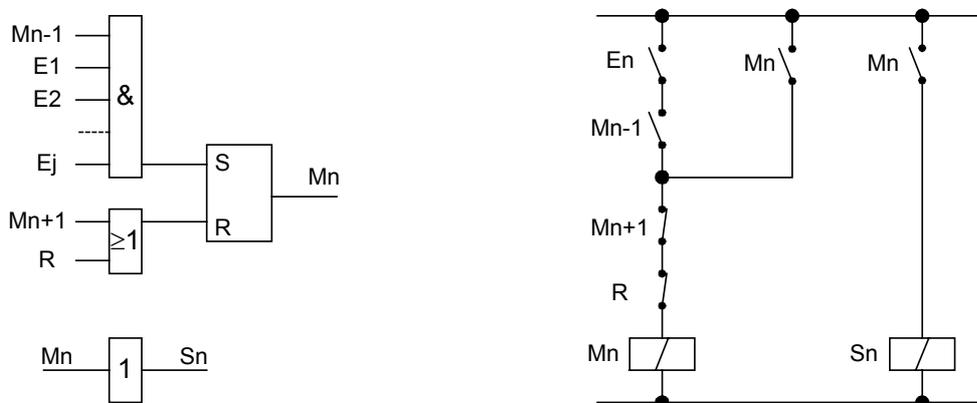


Figura 3.11 – Princípio de solução elétrico para lógica dos passos.

A execução puramente pneumática, realizando o processamento do sinal com válvulas pneumáticas, pode ser necessária em condições ambientais adversas ao uso da microeletrônica, ou desejada, em função de sua robustez, durabilidade, simplicidade, ou até pela cultura tecnológica dos recursos humanos disponíveis. Na figura 3.12 se faz um paralelo entre o bloco lógico básico usado no método passo a passo e sua execução com válvulas pneumáticas usuais (E, OU e a VD 3/2 como memória RS), enquanto que o quadro mostra a equivalência das respectivas notações, tais como são normalmente usadas.

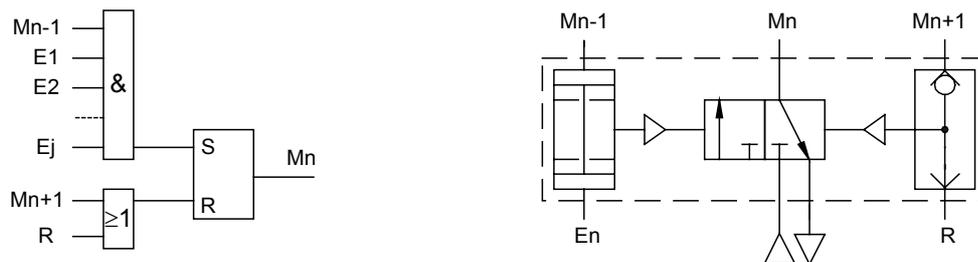


Figura 3.12 – Princípio de solução pneumático para a lógica dos passos.

### 3.6.2 Implementação de supervisores locais utilizando o método passo a passo

Os supervisores resultantes do processo de síntese apresentados na seção anterior são descritos como máquinas de estados finitos em que, para cada estado ativo, um conjunto de eventos controláveis deve ser desabilitado. Desta forma, a implementação do programa de controle consiste basicamente em fazer o CLP se comportar como um jogador de autômatos.

Segundo a proposta apresentada por QUEIROZ et al. (2001), a estrutura de controle é desenvolvida em três níveis estruturais: o nível dos Supervisores Modulares que desabilitam eventos da planta de acordo com as mudanças de estado da mesma; o nível de Sistema Produto que, seguindo os modelos supervisionados das plantas, é responsável por comandar o início das seqüências de operação; e o nível das Seqüências Operacionais que, observando os sinais de entrada do CLP e ajustando os sinais de saída, executa os ciclos de funcionamento de cada dispositivo. Essa estrutura de controle é ilustrada na figura 3.13. O modelo apresentado por QUEIROZ et al. (2001) caracteriza também uma contribuição do presente trabalho.

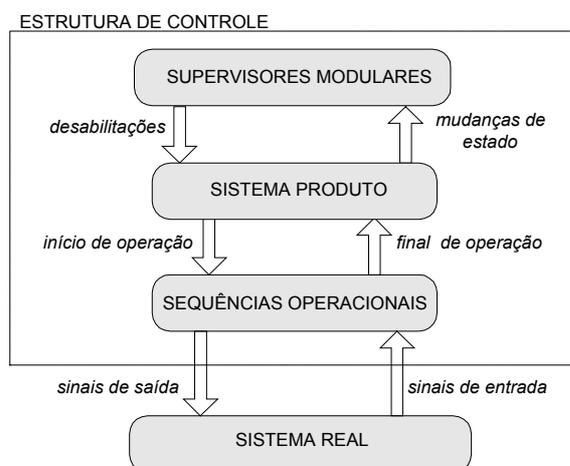


Figura 3.13 – Estrutura básica do sistema de controle (QUEIROZ et al., 2001).

Os subsistemas  $G_i$  são então representados como máquinas de estados assíncronas. As transições controláveis são automaticamente disparadas quando não são desabilitadas pelos supervisores. As transições não controláveis são disparadas por algum sinal da planta. Cada transição também sinaliza uma mudança de estado do supervisor, atualizando-o continuamente. Desta forma, evita-se que duas transições seguidas ocorram no sistema produto sem que os supervisores tenham sido atualizados.

A figura 3.14 ilustra o diagrama de funções (IEC 848) correspondente a um subsistema  $G_i$  que é representado por um autômato de dois estados. Um passo adicional anterior ao passo que em que efetivamente corresponde ao passo inicial do autômato foi adotado para atender os seguintes objetivos:

- caracterizar que o sistema está com todas as condições iniciais satisfeitas para que possa iniciar as ações associadas ao passo subsequente;
- preencher as condições de habilitação de memória correspondente ao passo 1 (correspondente ao passo inicial do autômato) e passo 2 (correspondente ao segundo estado do autômato).

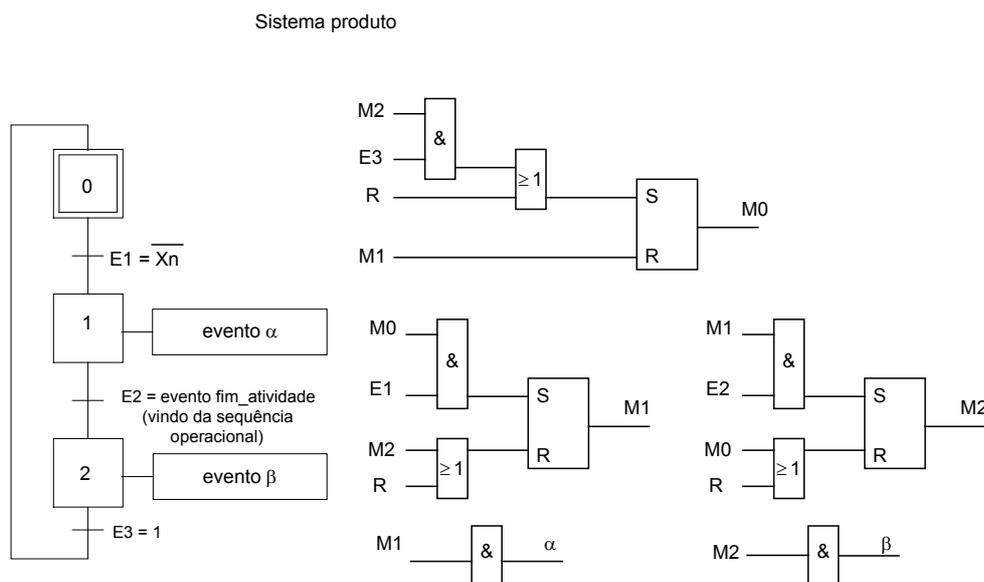


Figura 3.14 – Diagrama funcional e blocos lógicos correspondentes ao autômato  $G_i$ .

O sinal de desabilitação ( $Xn$ ) enviado pelo supervisor é colocado como condição de ativação (*set*) da memória do passo 1. Conseqüentemente, o evento  $\alpha$  (correspondente ao evento controlável) é restringido através do sinal enviado pelo supervisor. O supervisor evolui de acordo com a ocorrência dos eventos da planta, dessa forma a sinalização dessas ocorrências é também necessária (as ocorrências dos eventos  $\alpha$  e  $\beta$  atualizam os estados do supervisor). A ação dos

supervisores por sua vez é ativar as desabilitações de eventos controláveis do Sistema Produto quando um dos estados correspondentes à ação estiver ativo. A figura 3.15 ilustra o diagrama funcional e o correspondente bloco lógico do supervisor. Observe que o disparo das transições corresponde à ocorrência de algum evento do Sistema Produto.

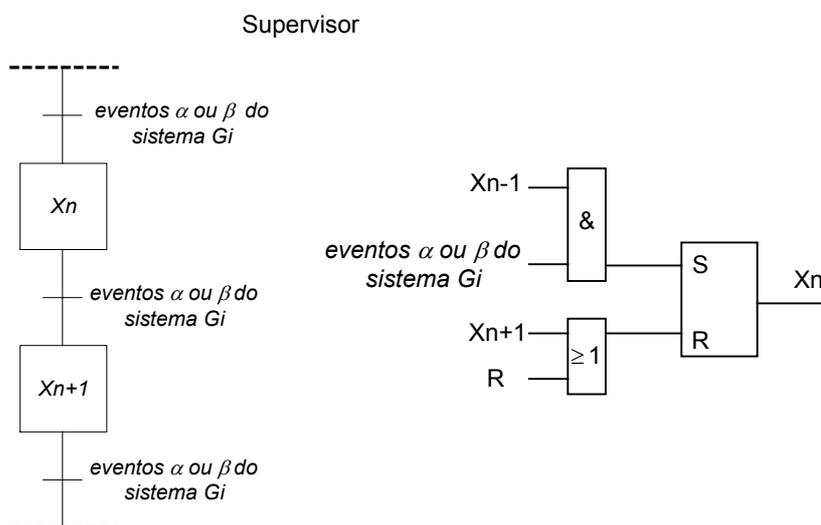


Figura 3.15 – Diagrama funcional e bloco lógico do supervisor.

As Seqüências Operacionais podem ser programadas como máquinas de estado, cujas transições iniciais são disparadas pelos sinais do Sistema Produto e as seguintes pelos sinais de entrada do CLP. Assim, os sinais de saída do CLP são ativados seqüencialmente conforme a lógica de funcionamento interno de cada dispositivo. O final de cada ciclo de operação deve ser sinalizado ao Sistema Produto ativando-se a respectiva variável booleana. Esta estrutura é mostrada na figura 3.16 a seguir.

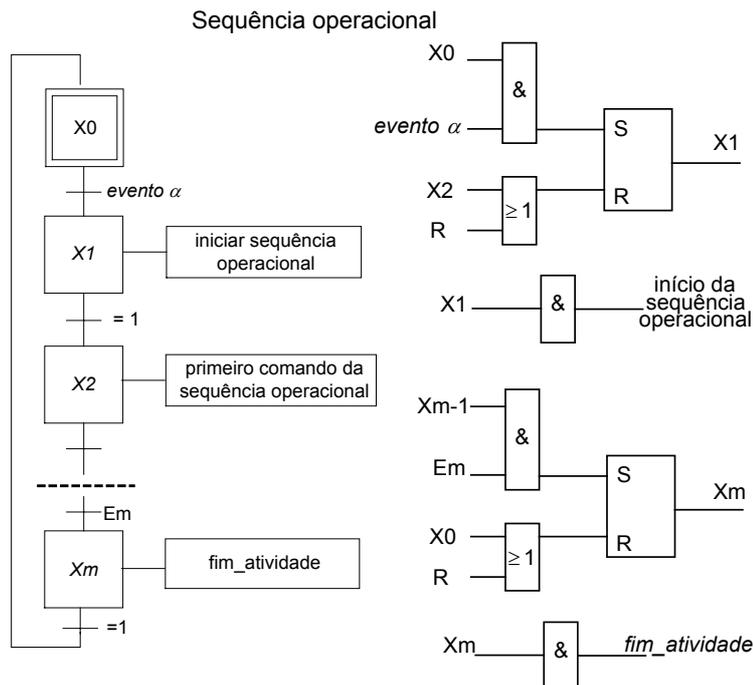


Figura 3.16 – Diagrama funcional e bloco lógico da sequência operacional.

### 3.7 Conclusões

A teoria de controle supervisorio (RAMADGE e WONHAM, 1989) foi desenvolvida como uma proposta de metodologia formal para a síntese automática de controladores ótimos para sistemas a eventos discretos, entre os quais se inclui os SMMAs. Foi mostrado neste capítulo que essa teoria se fundamenta na modelagem da planta e das especificações de controle por linguagens controláveis, de modo que o supervisor resultante gere a máxima linguagem controlável contida nessas linguagens.

Entretanto, a aplicação da Teoria de Controle Supervisorio em sistemas reais (BRANDIN, 1996) tem esbarrado na complexidade computacional dos cálculos envolvidos e no grande número de estados dos modelos resultantes. A razão para isso é que o número de estados do modelo que representa o sistema cresce exponencialmente com o número de subsistemas que o compõem. Assim, a complexidade do cálculo de supervisores ótimos, embora polinomial no número de estados do modelo da planta e da especificação, é um fator limitante em aplicações reais, as quais são geralmente modeladas pela composição de múltiplos sistemas locais (como é o caso de SMMAs).

Nesse sentido, QUEIROZ e CURY (2000a) (2000b) propõem tratar este fator limitante explorando, além da modularidade das especificações (WONHAM e RAMADGE, 1988), a própria modularidade natural da planta em sistemas de maior porte. Ao invés de se construir um único

controlador monolítico para toda a planta, na abordagem modular proposta procura-se construir, sempre que possível, um controlador local para cada especificação, modelando-o apenas em termos dos subsistemas afetados por sua ação. Neste caso, deseja-se que os supervisores resultantes sejam localmente modulares, isto é, que a ação conjunta dos supervisores tenha o mesmo desempenho que a do supervisor monolítico. Quando essa propriedade é verificada, a abordagem de controle modular é bastante vantajosa no sentido de promover maior flexibilidade, maior eficiência computacional e segurança na aplicação do controle.

Conforme mencionado no presente capítulo, é importante notar que a complexidade da verificação da modularidade local, embora menor que a da modularidade clássica, acaba crescendo exponencialmente com o número de especificações e subsistemas envolvidos. Esse aspecto limitante aponta para a necessidade do desenvolvimento de métodos mais eficientes para a verificação da modularidade.

De qualquer forma, os resultados da teoria de controle supervísório e da abordagem modular local podem contribuir fortemente para a atividade de projeto de controladores de diversos sistemas. A confiabilidade do projeto é aumentada tanto pela sistematização na sua condução como pela incorporação do formalismo lógico proveniente do modelo proposto por RAMADGE e WONHAM (1989).

Assim, pelas razões expostas e pelas vantagens inerentes às teorias apresentadas, é utilizada a abordagem modular local na síntese de controladores de SMMA's. Seguindo os objetivos do presente trabalho, esta abordagem é incorporada à descrição funcional do sistema, inserindo desta forma a perspectiva comportamental do SMMA em projeto. O capítulo seguinte apresenta o detalhamento de como a abordagem modular local baseada em linguagens controláveis é integrada na atividade de descrição funcional, visando a representação das três perspectivas no sistema em projeto: funcional, estrutural e comportamental.

#### 4. ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO CONCEITUAL DE SMMA's

Conforme abordado no capítulo 2, o projeto conceitual é visto como a mais importante fase do processo de projeto, pois decisões ali tomadas terão grande influência nas fases seguintes do processo de projeto. Também, no contexto de projeto de sistemas automatizados, ressaltou-se a importância da utilização de abordagens que tratem de forma concomitante o projeto da parte física e da parte de controle.

Uma sistemática que possibilite a integração efetiva das equipes de projeto, unificando as informações e proporcionando ao projetista maior segurança na tomada de decisão, será, sem dúvida, um grande passo para a resolução da maioria dos problemas que aparecem na condução do projeto. Os sistemas aqui tratados (SMMA's), mecanicamente complexos e que geralmente requerem um alto nível de automação, seriam mais rapidamente construídos utilizando uma abordagem integrada.

Nesse sentido, o capítulo 2 abordou o projeto conceitual de sistemas automatizados tanto no que se refere à parte física como à parte de controle, ressaltando a descrição funcional como técnica fundamental no processo de projeto. Também, esta visão geral mostrou as limitações das abordagens existentes bem como os requisitos necessários para alcançar um procedimento adequado de projeto visando a realização integrada deste. Em linhas gerais, observou-se que a descrição funcional, por sua importância dentro do projeto conceitual, deverá ter características específicas de forma que o resultado desta fase de projeto (a concepção) seja uma estrutura de controle associada a uma concepção física.

Para alcançar um modelo de concepção que englobe a parte física e de controle, propõe-se neste trabalho que a descrição funcional seja realizada em torno de dois modelos: a rede C/A, que provê o sistema em projeto com duas perspectivas, a funcional e a estrutural; e o modelo em linguagens e autômatos (incluindo o modelo RW) que provê a perspectiva comportamental do sistema em projeto. É através destes dois modelos que o objetivo fundamental do presente trabalho é alcançado, a integração do projeto físico e de controle; e é a partir desta fundamentação que se propõe que seja baseado o projeto conceitual de SMMA's.

A partir dos modelos apresentados nos capítulos 2 e 3 e da proposta de descrição funcional, é necessário estruturar o projeto conceitual de forma a disponibilizar ao projetista uma sistemática que englobe tais conhecimentos. O presente capítulo propõe então um modelo procedural do projeto conceitual de SMMA's, onde as atividades envolvidas são detalhadas, de forma a prover aos projetistas bases de conhecimento, meios, métodos e ferramentas para a sua execução. Aspectos específicos aos sistemas aqui tratados são discutidos com maior profundidade, bem como os requisitos adicionais necessários ainda para a realização do projeto conceitual integrado.

#### 4.1 Modelo procedural do projeto conceitual integrado de SMMA's

Conforme visto, o projeto conceitual, que segue após o levantamento dos requisitos de projeto da fase informacional, busca identificar um ou mais princípios de solução que atendam a todas as necessidades especificadas. Da combinação destes princípios de solução, algumas concepções são geradas e uma delas será escolhida para ser trabalhada na fase do projeto preliminar. Pretende-se aqui que o projetista maximize o número de informações obtidas nesta etapa (no que se refere ao sistema de controle e físico) de forma a, além de diminuir o tempo para a elaboração do projeto e incrementar a confiabilidade do SMMA projetado.

O projeto conceitual tem como atividade fundamental a descrição funcional, que é o elo entre os requisitos de projeto e a concepção inicial do sistema. No presente trabalho, esta atividade é realizada de acordo com os fundamentos apresentados nos capítulos 2 e 3. No modelo proposto para o projeto de SMMA's as ferramentas utilizadas no projeto do sistema físico (descrição funcional) são agora integradas com as relacionadas ao projeto do sistema de controle (teoria de controle supervísório).

O processo de projeto conceitual proposto no presente trabalho é ilustrado na figura 4.1. A partir de uma especificação de projeto elaborada no projeto informacional, o projeto conceitual é iniciado. A figura 4.1 apresenta as atividades relacionadas ao sistema físico e ao sistema de controle, sendo que a execução de algumas destas ocorre de forma simultânea. Os bancos de dados do processo de projeto disponibilizam as seguintes informações:

- Conjuntos de soluções na forma de catálogos de projeto;
- Dados sobre tecnologias existentes, principalmente no que se refere a processos (modificação de forma, superfície, dentre outros);
- Modelos em autômatos do comportamento elementar de agências;
- Modelos em autômatos de especificações operacionais associadas a SMMA's;
- Módulos dos Sistemas Produto e Supervisores Modulares em linguagem de programação de CLPs.

Cada um destes bancos de informações será consultado durante a execução de determinadas atividades no processo de projeto. Nas próximas seções serão detalhadas cada uma destas atividades, ressaltando a sistemática adotada e as ferramentas de suporte bem como o detalhamento das informações contidas em cada banco de dados. Como o banco de dados relacionado a princípios de solução já é algo bastante usual e citado freqüentemente na literatura especializada, especial ênfase será dada na descrição das informações relacionadas aos modelos de especificações operacionais e módulos em linguagem de programação.

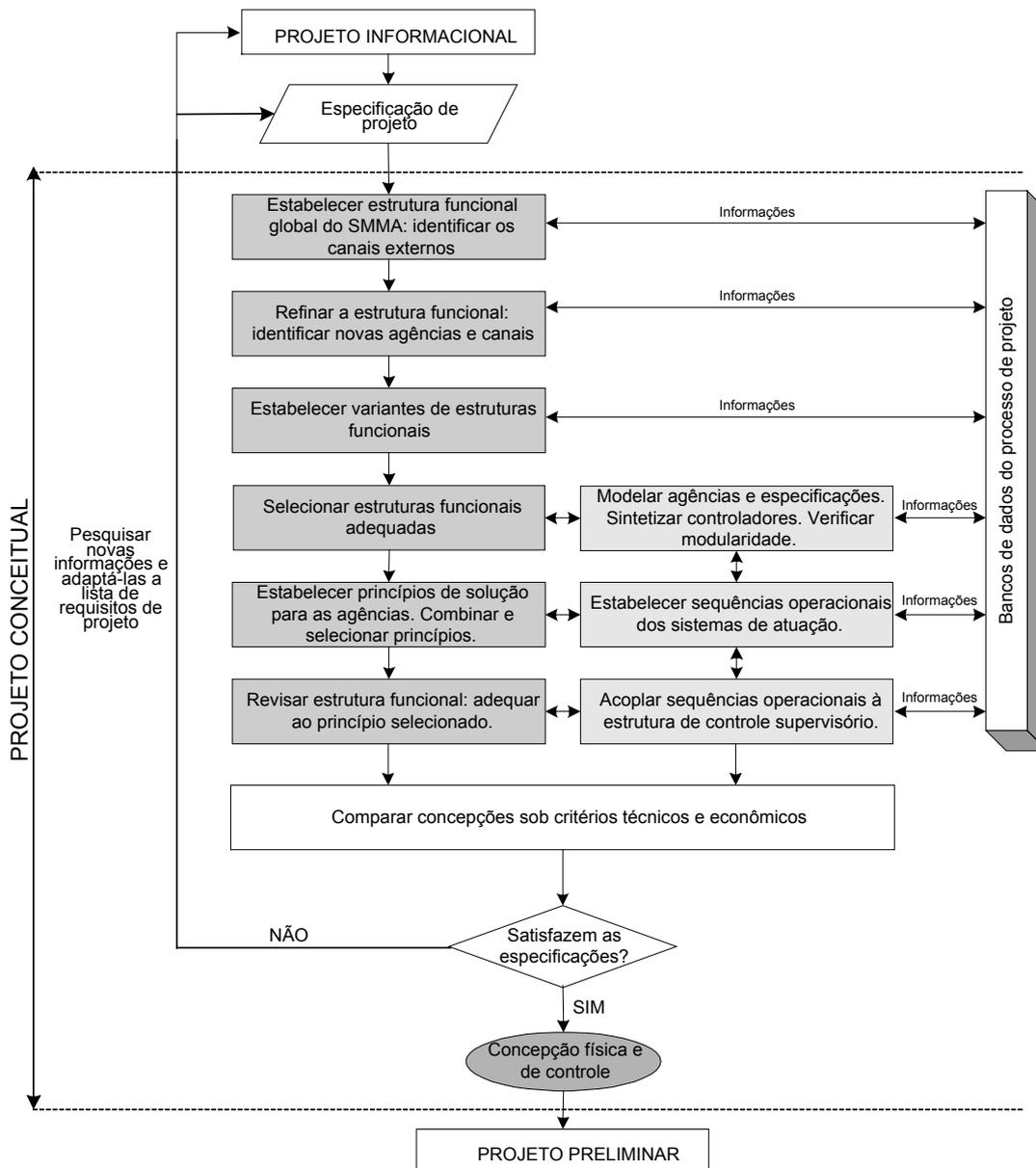


Figura 4.1 – Projeto conceitual proposto para SMMA.

#### 4.2 Especificação de projeto

Segundo a abordagem de PAHL e BEITZ (1989), a primeira atividade recomendada para o desenvolvimento do projeto conceitual é a análise das especificações de projeto com respeito às funções requeridas e às restrições de projeto. A lista de especificações de projeto é o último e principal modelo do projeto informacional, sendo o ponto de partida e também o guia para o processo de projeto de um produto, pois fornece parâmetros para avaliação dos modelos do sistema desenvolvidos ao longo do processo de projeto. Segundo FERREIRA (1997), o formato e conteúdo das especificações apresentam variações de acordo com o autor. A metodologia desenvolvida por

FONSECA (1996) propõe uma lista de especificações que só incorpora informações mensuráveis, objetivando a transformação de informações essencialmente qualitativas, as necessidades, em informações quantitativas dos requisitos de engenharia, sem no entanto estabelecer metas numéricas para estes.

FONSECA (1996) aponta ainda que as especificações de projeto devem ser acompanhadas também de restrições de uso, funcionais, financeiras, legais, normativas e operacionais importantes, da descrição sintética das características principais do produto ou sistema e de qualquer outro elemento importante que a equipe de desenvolvimento do projeto estime ser assinalado no documento como elemento de avaliação posterior.

O processo que leva à lista de especificações é um tema que, por sua amplitude e profundidade, não cabe no escopo desta tese. Conforme mencionado, esta lista é o último modelo da fase anterior, o projeto informacional, que também não é abordado no presente trabalho. De qualquer forma, é importante proporcionar ao projetista um ponto de partida em seu trabalho imediatamente posterior, o de descrição funcional. Nesse sentido, e de acordo com as recomendações de FONSECA (1996) e PAHL e BEITZ (1989), elabora-se a classificação das especificações por categoria e o ordenamento por grau de importância. Com respeito a categoria, pode-se citar as seguintes especificações para o projeto de SMMA:

- Em relação ao produto: informações sobre as peças ou partes de entrada no sistema quanto a dimensão, peso, material, dentre outros; produto final com informações disponíveis; processos e/ou montagens necessárias para alcançar o produto final bem como tecnologias existentes;

- Em relação ao sistema físico: locais de entrada no sistema e o modo de alimentação (se ordenada, aleatória, manual, automática etc.); locais de saída e modo de retirada (se manual, automática, em batelada, etc);

- Em relação aos objetivos do sistema: automatização completa para redução do número de pessoas necessárias; atender a um certo volume de produção; automatização para redução do tempo de processamento ou alcance de determinada capacidade de processamento (MIYAGI, 1996);

- Em relação ao sistema de controle: implantação de controle centralizado sob comando de um número limitado de pessoas; necessidade de funções de monitoramento; necessidade de funções de seleção do local de operação, dentre outros (MIYAGI, 1996).

Para a atividade posterior, a descrição funcional, as especificações que serão inicialmente utilizadas serão aquelas que dizem respeito ao produto e ao sistema físico, pois são estas que definem a estrutura inicial do SMMA em projeto. De qualquer forma, conforme evidenciado em FERREIRA (1997), a lista de especificações é um documento dinâmico, evolucionário, abrangente, que após a realização do projeto deve ter evoluído de modo a representar as características do produto final. Deste modo, o produto projetado deve estar em sintonia com a lista de especificações, ainda que esta tenha se modificado no decorrer do processo de projeto.

### 4.3 Estabelecimento da estrutura funcional global de um SMMA

De acordo com a figura 4.1, a primeira atividade do projeto conceitual é a elaboração da estrutura funcional genérica do SMMA a ser construído. Esta etapa consiste basicamente em, a partir da identificação das peças brutas ou componentes e dos produtos finais, estabelecer os canais de entrada e de saída onde serão armazenados os produtos a serem manipulados, processados e/ou montados. Conforme discutido na seção anterior, a definição das peças ou partes de entrada e saída do SMMA bem como a definição dos locais físicos de entrada e saída foi levantada na lista de especificações de projeto. A estrutura genérica obtida a partir destas informações é ilustrada na figura 4.2.

A estrutura funcional genérica deve expressar a principal agência (ou principais agências) de um sistema através do relacionamento entre os produtos de entrada e saída. Dentro da lista de especificações, buscam-se as informações relacionadas aos produtos de entrada e saída e a funcionalidade do sistema.

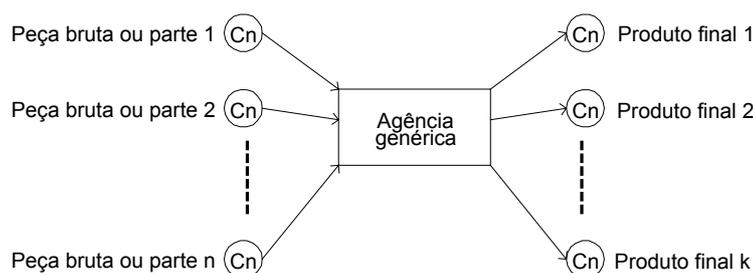


Figura 4.2 – Estrutura funcional genérica de um SMMA em projeto.

Os canais de entrada e saída da agência genérica tanto podem estar presentes na lista de especificações (impondo um local físico para aquela peça ou parte) como poderão surgir em decorrência do processo de decomposição. Neste último caso, as localizações ainda não foram definidas e, portanto, o projetista terá liberdade para determinar o número de canais de entrada e/ou saída. Por sua vez, a agência genérica representa o sistema global que, sob determinado comportamento, realizando as tarefas programadas, cumpre a função especificada. De qualquer forma, no mínimo um canal de saída da agência genérica deve existir desde o início, representando a necessidade de se projetar algo.

Em determinadas situações, sabe-se de antemão que as peças ou partes fornecidas ao sistema em projeto terão características pré-concebidas, como por exemplo a localização específica para cada produto ou uma única localização para todos (aleatória ou não); a capacidade de armazenagem dos locais dos produtos de entrada e/ou saída; o número de locais de armazenagem dos produtos de

saída bem como suas capacidades. Enfim, todas estas informações disponíveis e levantadas na lista de especificações, servem de base para a elaboração de um modelo inicial da estrutura funcional global.

A partir deste modelo abstrato, o projetista deverá colher as informações indicadas na lista de especificações com respeito às atividades identificadas como essenciais para a realização do objetivo final do SMMA projetado. Tais atividades englobam processamento de peças (modificação de forma, constituição, dentre outros – segundo VDI 2860) ou montagem de partes. Esse levantamento de atividades será utilizado como suporte ao processo de refinamento da estrutura funcional genérica (etapa seguinte).

Complementarmente à representação gráfica e esquemática provida pela rede C/A, pode-se trabalhar com uma estrutura genérica expressa semanticamente por uma declaração única e concisa das funções mais importantes do sistema a ser projetado. Essa declaração poderá facilitar o entendimento dos objetivos do sistema e auxiliar a atividade posterior, o refinamento funcional. Um exemplo de declaração é dado a seguir:

*“Projete um sistema que monte apontadores de lápis, embale-os em caixas de tamanhos pré-determinados e armazene-os em locais definidos”.*

#### **4.4 Refinamento da estrutura funcional (decomposição funcional)**

O primeiro passo em direção à escolha de uma alternativa de concepção para o projeto é o fracionamento de um problema complexo. Nesta etapa, o projetista realiza o refinamento da estrutura funcional requerida para o sistema. É conveniente que se esboce a estrutura de funções através do desdobramento de um processo (normalmente existem vários processos) necessário para compor o fluxo principal do sistema (entradas e saídas da matéria).

Considerando-se os processos essenciais que estarão presentes no SMMA, a estrutura genérica é refinada. De maneira geral, no primeiro refinamento o projetista leva em conta a execução das tarefas principais, alocando um canal de trabalho (onde os processos ocorrem) para cada uma destas tarefas. O avanço do refinamento se dá à medida que o projetista identifica novos canais de trabalho, canais sem atividades, agências adicionais de suporte às atividades principais, canais de armazenagem, dentre outros. Este processo se dá pela constante verificação dos requisitos de projeto (de forma a buscar estruturas funcionais mais concretas) bem como pelo levantamento inicial de sistemas, tecnologias e equipamentos similares (através de catálogos ou banco de dados).

Também, ramificações ou bifurcações na estrutura funcional poderão surgir em decorrência de processos sendo executados de modo concorrente. De maneira geral, estas sub-estruturas serão unidas de alguma forma, seja através de canais ou agências em comum (sendo estes os elementos de união).

Paulatinamente, a estrutura de funções é desenvolvida pela identificação de novos canais e agências de forma a assegurar o estabelecimento de todos os requisitos operacionais. Em outras palavras, no processo de refinamento progressivo devem ser identificadas as agências principais relacionadas aos processos e/ou montagem, bem como aquelas relacionadas aos sistemas de transporte (manipulação) que interligam um canal a outro. Deve-se desenvolver e desdobrar a estrutura de funções até que as suas agências se encontrem num nível de descrição que permita ao projetista verificar que o produto final foi alcançado, ou seja, todos os processos e/ou montagens necessários foram realizados.

A figura 4.3 a seguir ilustra as diretrizes descritas anteriormente para a execução do refinamento da estrutura funcional global. O primeiro refinamento é baseado no número de processos e/ou montagens requeridos (as agências Ag2 e Ag4 representam tais processos), enquanto no segundo o refinamento é realizado com respeito à identificação de ramificações na estrutura funcional (ramificação paralela em decorrência da decomposição da agência Ag1). No segundo refinamento, o projetista estabelece que a retirada de matéria dos canais de entrada do sistema será realizada através de agências distintas (Ag11 retira matéria do canal Cn3 e Ag12 retira matéria dos canais Cn1 e Cn2).

Segundo apontado por SVENDSEN e HANSEN (1993), a atividade de decomposição funcional na maioria das vezes é embasada na experiência do projetista, geralmente em sistemas simples e nenhuma atenção é dada com respeito às leis ou métodos que regem tal atividade. FERREIRA (1997) ainda ressalta que os modelos funcionais são ainda essencialmente semânticos e altamente abstratos. De qualquer forma, entende-se aqui que, apesar do processo naturalmente criativo que envolve o refinamento funcional, a adoção das recomendações expostas na presente seção pode auxiliar o projetista durante a execução da tarefa, inserindo a esta uma sistematização.

De qualquer forma, o refinamento funcional não é um fim em si próprio, mas visa facilitar a descoberta de soluções, e, a exemplo do que ocorre com a lista de especificações, a estrutura de funções também deve ser atualizada e refinada à medida que o projeto de desenvolve.

Outro ponto importante a ressaltar é em relação ao limite de refinamento de uma estrutura funcional. Foi citado que a decomposição deve avançar até o projetista identificar a realização de todos os processos e/ou montagens que os produtos de entrada necessitam sofrer de forma que os produtos finais sejam alcançados. Este nível de entendimento só é alcançado quando o projetista identificou possíveis soluções para as diversas agências, mesmo que em estágios iniciais do refinamento. Pode-se observar aqui que a causalidade vertical (ver capítulo 2, seção 2.) está presente no processo de decomposição do tipo de sistema aqui tratado.

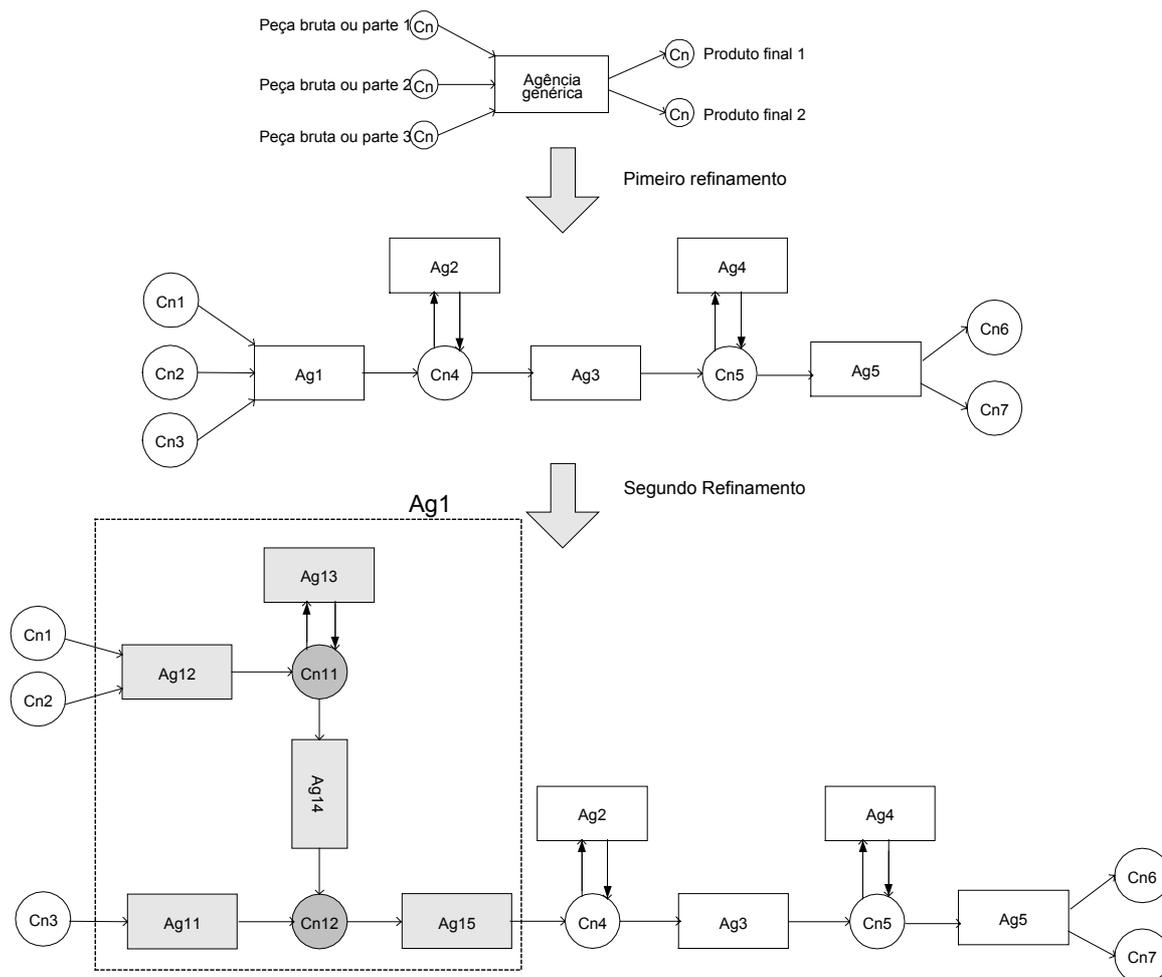


Figura 4.3 – Ilustração do processo de refinamento de uma estrutura funcional genérica.

O desdobramento da estrutura funcional depende também do contexto em que se insere o projeto. No presente trabalho, se estão projetando sistemas que são classificados por HUBKA e EDER (1988) como plantas. Portanto, o nível de detalhamento das agências se dará em termos de mecanismos ou dispositivos. Como exemplo, a uma determinada agência poderá estar associado como princípio de solução um dispositivo de montagem, que eventualmente poderá ser formado por diversos sensores e atuadores. Assim, não se está aqui interessado no projeto de dispositivos como atuadores ou válvulas, mas mecanismos compostos destes.

#### 4.5 Estabelecimento de variantes de estruturas funcionais

De acordo com FERREIRA (1997), o refinamento funcional não deve nunca levar imperativamente a uma única estrutura de funções. Ao contrário, a força da descrição funcional está justamente na possibilidade de criar e comparar, num nível abstrato, alternativas para a

estrutura funcional do sistema em projeto. De maneira geral, o estabelecimento das variantes de descrições funcionais poderá ser feita das seguintes formas:

1. Modificação da estrutura da rede C/A;

2. A partir de uma mesma estrutura em rede C/A, classificar as agências de acordo com sua implementação (princípio de solução);

3. Combinação das duas formas acima.

A obtenção de variantes de descrições funcionais através de diferentes configurações em rede C/A é um processo baseado fundamentalmente na criatividade e observação do projetista. Este poderá descrever uma seqüência de atividades ou processos através de diferentes formas, ou em outras palavras, utilizando-se da liberdade de criação para elaborar diversas possibilidades estruturais. Aqui o projetista decide a seqüência dos processos e/ou montagens, a existência de canais intermediários, ramificações ou junções na estrutura, o número de agências de transporte ou manipulação, dentre outros. A figura 4.4 a seguir ilustra o estabelecimento das variantes funcionais obtidas a partir do processo de refinamento.

Na figura 4.4, pode-se observar que na segunda variante funcional o projetista fez duas opções diferentes em relação à primeira variante: a criação de mais uma agência que retira a matéria do canal 3 (Ag14) e a manutenção da agência Ag2 no mesmo canal estabelecido na estrutura original. Ainda na segunda variante, a agência Ag3 foi refinada significando que existirá um canal intermediário entre os processos realizados pelas agências Ag2 e Ag4.

A segunda forma de obtenção de variantes funcionais é associar a determinadas agências soluções prévias, ainda num nível abstrato, de forma a modificar a estrutura original da rede C/A. Nesse caso, o projetista identifica agências que podem ser realizadas através de um mesmo princípio de solução, e assim pode realizar modificações estruturais de acordo com a localização na rede destas agências. Para ilustrar esta forma de definir variantes funcionais, a figura 4.5 mostra três estruturas funcionais idênticas, onde o estabelecimento de variantes se dá na identificação de agências que podem ser implementadas pelo mesmo princípio de solução. Estas agências estão sombreadas na figura 4.5.

Na figura 4.5, a variante funcional 1 apresenta todas as agências independentes, ou seja, quando da busca por princípios de soluções todas estas serão realizadas por mecanismos distintos. A variante funcional 2 apresenta as três agências realizadas pelo mesmo princípio de solução, sendo rotuladas pelo mesma notação Ag1. Por fim, a variante funcional 3 apresenta duas agências que são realizadas pelo mesmo princípio de solução.

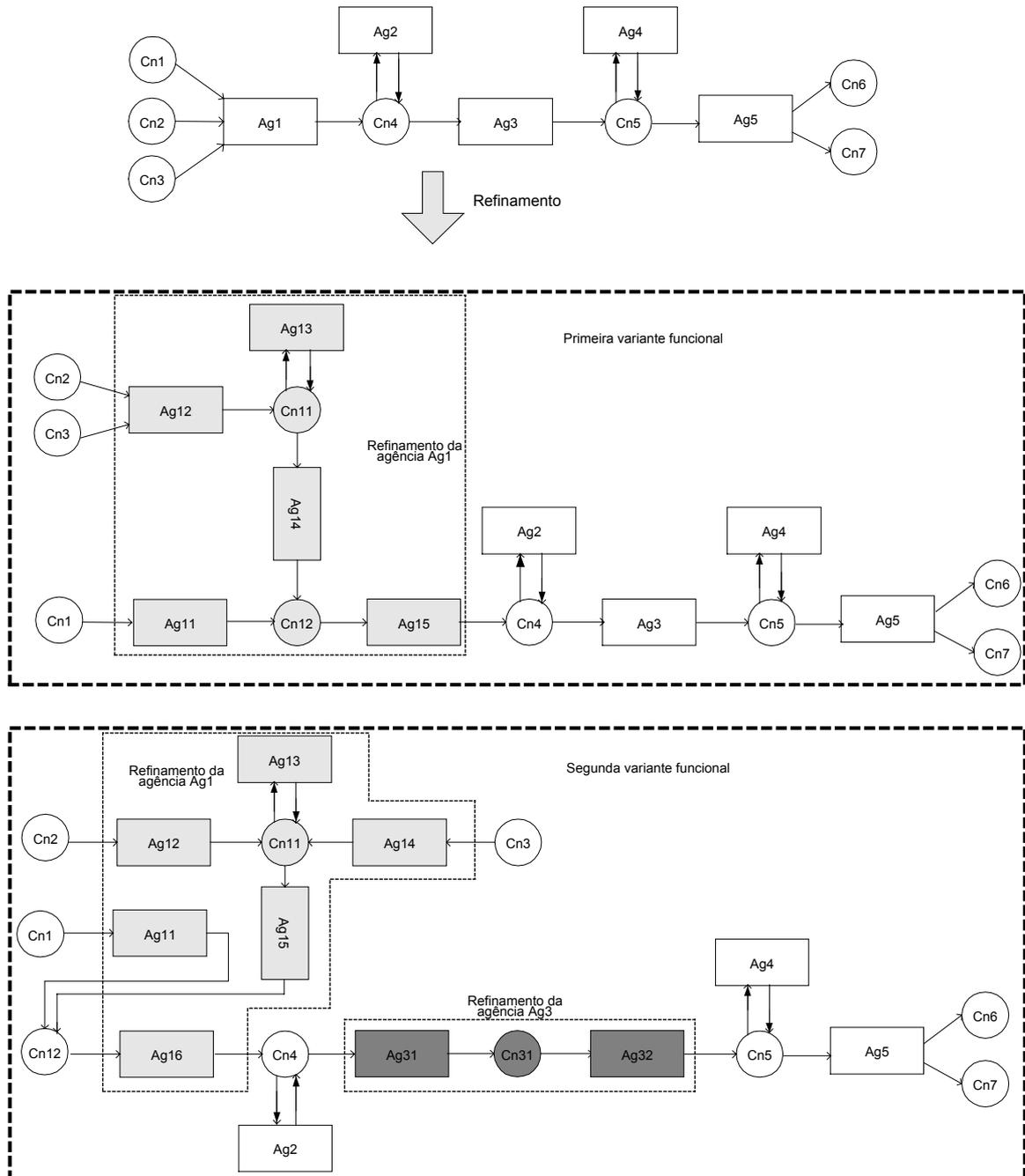


Figura 4.4 – Exemplo de estabelecimento de variantes funcionais através de modificação da estrutura da rede C/A.

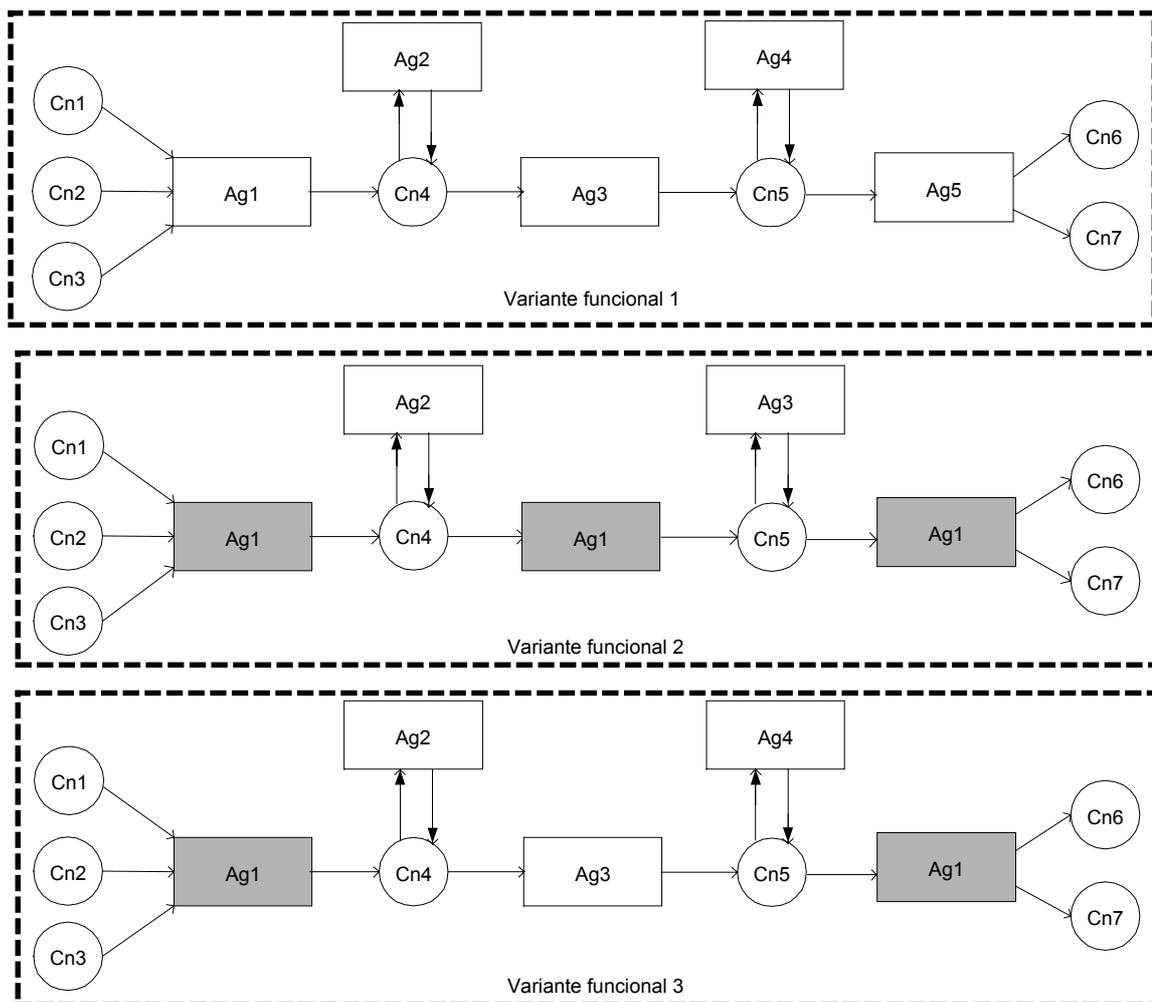


Figura 4.5 – Exemplo de estabelecimento de variantes funcionais de acordo com a forma de implementação de determinadas agências.

Poder-se-ia questionar neste momento se este processo pode ser realmente definido como estabelecimento de variantes funcionais ou se não seria parte da síntese de soluções. Na verdade, o projetista define as agências como similares baseado num princípio de solução. Entretanto, este princípio de solução ainda está num nível abstrato, ou seja, o projetista sabe que determinadas agências serão executadas pela mesma solução física, entretanto ele não sabe especificar ainda como será esta solução, ou seja, qual mecanismo que será selecionado. Enfim, o princípio da causalidade vertical está sendo aplicado, uma vez que identificadas as agências necessárias, é identificado o princípio de solução que satisfaz simultaneamente a função especificada.

A respeito de que soluções se enquadram nesta forma de criar variantes funcionais, as mais comuns em SMMAs são as mesas giratórias e as esteiras transportadoras. A figura 4.6 abaixo ilustra uma rede C/A com agências selecionadas de forma a serem implementadas pelo mesmo princípio de solução, sendo os prováveis candidatos a tais princípios uma mesa giratória e uma

esteira (sendo estes definidos na etapa de busca de soluções). Observa-se que o projetista neste momento não define qual será especificamente o mecanismo a realizar nas agências nesta etapa, mas aproxima a estrutura funcional de um sistema físico concreto, através da imposição de características das agências (as funções destas agências serão realizadas pelo mesmo princípio de solução).

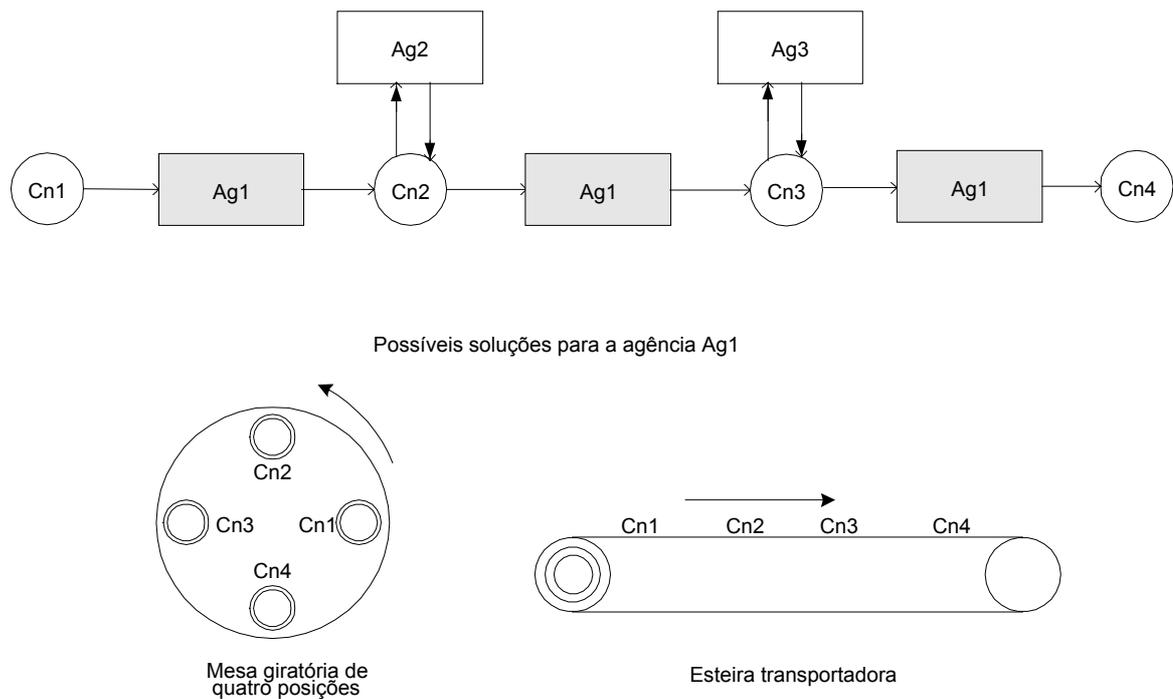


Figura 4.6 – Agências realizadas pelo mesmo princípio de solução e candidatos possíveis a implementação de tal princípio.

Assim, agências identificadas como equivalentes (realizadas pelo mesmo princípio de solução) causam a movimentação simultânea da matéria nos canais servidos por estas. A figura 4.7 a seguir ilustra este aspecto, onde a agência Ag1 apresentada na figura 4.6 é condensada resultando numa estrutura mais compacta. Nesta, pode-se observar de forma mais clara e didática todos os canais afetados pela agência Ag1. A realização da atividade correspondente a esta agência acarreta a retirada e o depósito de matéria de forma simultânea nos canais Cn2, Cn3 e Cn4.

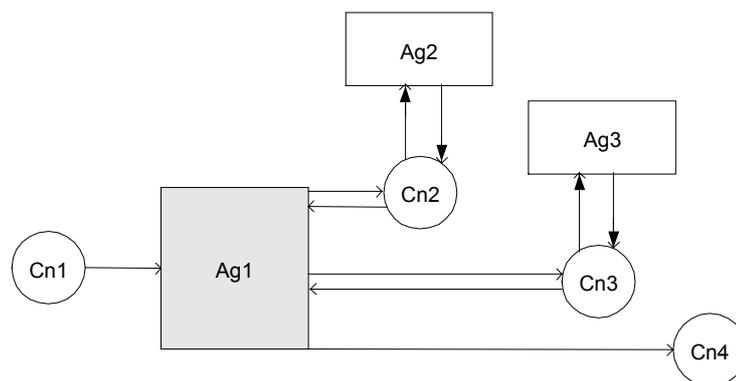


Figura 4.7 – Exemplo de condensação de agências similares.

Em termos de execução física, estes efeitos simultâneos manifestados nos canais podem ser mais facilmente entendidos. Por exemplo, no caso de uma mesa giratória ou esteira, o mecanismo sendo ativado acarreta a movimentação de todos os locais físicos afetados por ele. Mostrar-se-á no capítulo 5 que a modelagem das especificações sobre os canais afetados por agências equivalentes sofrem uma sensível modificação quando comparadas àquelas sobre canais afetados por agências não equivalentes.

#### 4.6 Seleção das estruturas funcionais, modelagem das agências e especificações, síntese dos controladores e verificação da modularidade

De posse das alternativas de estruturas funcionais, nesta etapa o projetista seleciona aquelas mais promissoras em relação às especificações de projeto e que devem, portanto, ser levadas adiante no processo de projeto. Tais estruturas funcionais, representadas através da rede C/A, descrevem o sistema sob a perspectiva funcional e estrutural, conforme discutido no segundo capítulo. A partir das estruturas selecionadas, é então possível a inserção da perspectiva comportamental do sistema em projeto, completando a descrição funcional proposta no presente trabalho.

A inserção da perspectiva comportamental na descrição funcional baseia-se em especificar o comportamento desejado para os recursos nos canais. Para realizar esta inserção, inicialmente obtêm-se modelos em autômatos para representar o comportamento das agências. Em seguida, obtêm-se também modelos em autômatos para as especificações desejadas sobre os canais. São estas especificações que impõem restrições sobre o comportamento da agência de forma que os efeitos nos canais sejam cumpridos e a função global do sistema alcançada. De posse dos modelos comportamentais das agências e especificações obtêm-se controladores que, restringindo a operação das agências, impõem um correto fluxo de matéria no SMMA projetado.

Esta visão está de acordo com a abordagem funcional proposta por CHANDRASEKARAN e KAINDT (1996), que associa o conceito de função com a criação de efeitos no mundo externo, e o objeto que executa a função é conectado com outros objetos ou com o meio ambiente através de portas físicas.

A teoria de controle supervisorio apresentada no terceiro capítulo é utilizada nesta etapa para dar suporte à descrição comportamental do sistema através da representação por autômatos e linguagens controláveis. Dessa forma, com as estruturas funcionais selecionadas, é necessário aplicar os fundamentos da teoria de controle supervisorio apresentada no terceiro capítulo. A abordagem adotada no presente trabalho é aquela do controle modular local proposta por QUEIROZ e CURY (2000a) (2000b). A sistematização da aplicação desta abordagem é então implementada nas seguintes etapas, já dentro do contexto de projeto conceitual de SMMAs:

1. Identificar o conjunto de agências envolvidas na estrutura funcional obtida;
2. Construir o modelo básico ADEF (Autômato Determinístico de Estados Finitos)  $G_i$ , de cada agência  $i$  envolvida na estrutura funcional de forma mais sintética possível;
3. Calcular a mais refinada Representação por Sistema Produto (RSP), fazendo-se a composição dos subsistemas síncronos.

Seguindo a proposta metodológica de QUEIROZ (2000), os próximos passos para a síntese de supervisores localmente modulares são descritos sinteticamente abaixo:

4. Modelar cada especificação isoladamente, considerando apenas os eventos relevantes;
5. Obter a planta local para cada especificação compondo-se os subsistemas da RSP que tenham eventos em comum com ela;
6. Calcular a linguagem de cada planta local que satisfaça a especificação, através do produto síncrono da cada planta local com sua respectiva especificação;
7. Calcular a máxima linguagem controlável contida em cada especificação local;
8. Verificar a modularidade local das linguagens resultantes;
9. Se não forem modulares, procurar resolver o problema de não modularidade por outra abordagem;
10. Se forem modulares, implementar um supervisor local para cada linguagem controlável.

Apresentada a metodologia, observa-se que a primeira atividade é a obtenção de um modelo da planta ou, no contexto do presente trabalho, um modelo comportamental da agência da(s) rede(s) C/A selecionada(s). Um exemplo de modelo comportamental de uma agência é mostrado na figura 4.8, onde os eventos  $\alpha$  e  $\beta$  do autômato representam o início e fim de operação da agência mostrada. Nesse caso, a ocorrência do evento  $\alpha$  implica na retirada da matéria presente no canal de entrada, enquanto a ocorrência do evento  $\beta$  implica no depósito de matéria no canal de saída.

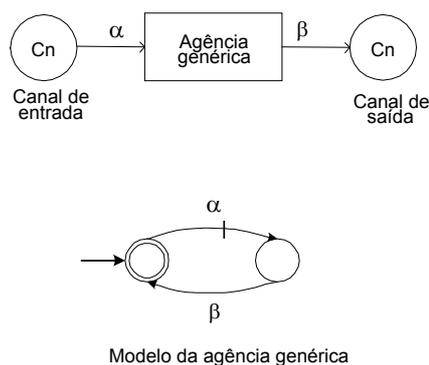


Figura 4.8 – Exemplo de modelo comportamental de uma agência.

O passo seguinte é a obtenção das especificações operacionais que se deseja impor ao sistema. Na descrição funcional, são os modelos destas especificações que representam os efeitos esperados nos canais e; o cumprimento da função do sistema ocorrerá no momento em que tais efeitos se manifestem nas portas (canais) de saída, segundo os fundamentos apresentados no início desta seção. Um exemplo ilustrativo da modelagem das especificações é apresentado na figura 4.9, que mostra também a rede C/A e o modelo comportamental das agências correspondentes.

A figura 4.9 mostra duas agências que têm por objetivo transportar a peça do canal A até o canal C e uma outra agência (Agência 2) que executa determinada atividade no canal B. Tais agências podem ser modeladas por um autômato de dois estados, podendo ser entendidos da seguinte forma: no estado inicial a agência está inativa e no outro estado a agência está em operação (ativa). No caso das agências 1 e 3, a ocorrência dos eventos  $\alpha$  e  $\beta$  acarreta a retirada e depósito da matéria dos canais de entrada e saída, respectivamente. Os modelos das agências correspondem ao Sistema Produto, enquanto que, a partir das especificações relacionadas ao canal, pode-se obter três supervisores modulares que farão com que as agências realizem a função desejada. As especificações impostas ao canal são descritas como segue: a especificação E1 garante a não ocorrência de *overflow* e *undeflow* do canal B; a especificação E2 garante que a peça, ao chegar no canal B, é processada (ou montada) pela agência Ag2; a especificação E3 garante que a peça só é retirada do canal B após o final de operação da agência Ag2.

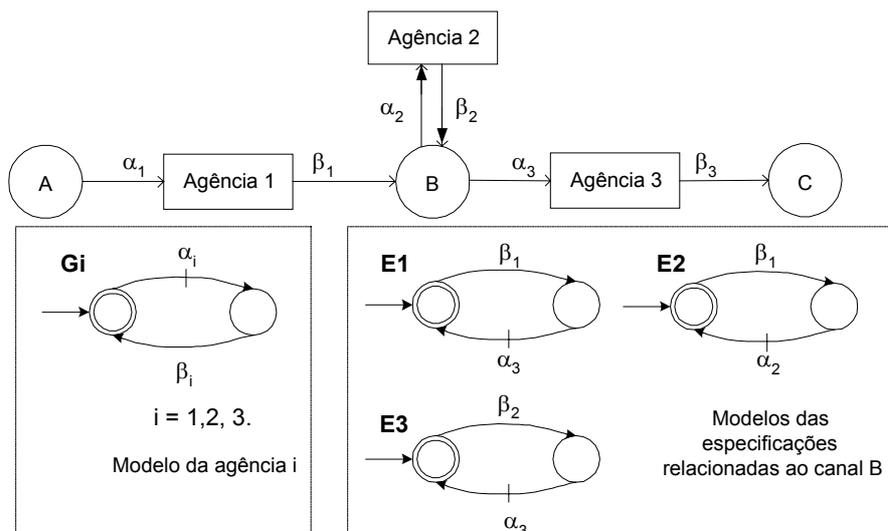


Figura 4.9 – Descrição funcional de um SMMA.

Seguindo a metodologia de síntese de supervisores, é necessário obter a planta local para cada especificação compondo-se os subsistemas da RSP que tenham eventos em comum com ela. Calcula-se então a linguagem de cada planta local que satisfaça a especificação através do produto síncrono de cada planta local com sua respectiva especificação. Em seguida, calcula-se a máxima linguagem controlável contida em cada especificação local para finalmente verificar a modularidade local das linguagens resultantes. A figura 4.10 a seguir apresenta os três supervisores localmente modulares que realizam as especificações impostas ao canal B da estrutura apresentada na figura 4.9.

Reportando-se ao terceiro capítulo, a modularidade local garante que não há nenhuma perda de eficiência entre esta solução modular apresentada e a melhor solução centralizada. Pode-se então implementar um controlador local para cada linguagem controlável. Entretanto, quando a modularidade das especificações não for verificada, o controle modular local não pode ser diretamente aplicado. Uma alternativa evidente é a aplicação do controle centralizado para as especificações conflitantes. Na literatura podem ser encontradas diversas abordagens distintas para a resolução de conflitos, como é o caso da abordagem de controle modular e coordenação apresentada por WONG e WONHAM (1998), do controle modular com prioridades (CHEN et al., 1995) e do esquema para resolução de conflitos apresentado por WONG et al. (1995).

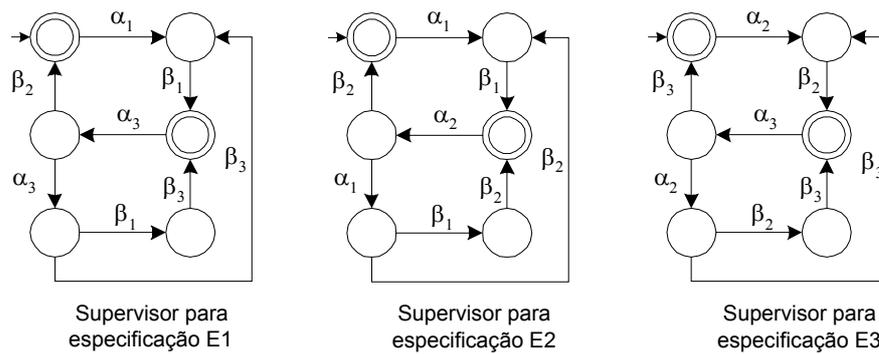


Figura 4.10 – Supervisores locais para o exemplo apresentado na figura 4.9.

Dessa forma, devido à execução das agências 1, 2 e 3 segundo as restrições impostas pelos supervisores apresentados na figura 4.10, o comportamento final do sistema representado pela estrutura funcional mostrada na figura 4.9 será confinado de forma a resultar na criação dos efeitos necessários no mundo exterior (nos canais) para cumprir o objetivo especificado.

Assim, consegue-se estabelecer o problema de controle supervísório ainda na fase do projeto conceitual, alcançando a simultaneidade de atividades conforme proposta já citada. A estrutura de controle resultante desta fase (supervisores e sistemas produto) será posteriormente acoplada às seqüências operacionais quando os princípios de solução forem estabelecidos. De qualquer forma, uma estrutura de controle inicial é alcançada antes do sistema físico estar projetado ou implementado.

Observa-se assim que até esta etapa nenhuma referência foi feita à estrutura do sistema que realizará cada uma das agências. O modelo funcional proposto descreve o objetivo do sistema para o usuário humano, não sendo uma abstração do comportamento do sistema (algo já construído, como na abordagem de representação funcional). Na verdade, a partir da mudança de estado da matéria (que ocorre no canal) representada pelas especificações (figura 4.9) o comportamento do sistema pode ser extraído.

Por sua vez, comparando a abordagem funcional segundo a escola alemã de projeto, os canais que ligam agências através de arcos não necessariamente caracterizam uma relação causal. De fato, os canais englobam recursos de energia, matéria e informação que fluem através da agência; a relação de causa e efeito entre atributos destes recursos é demonstrada através de máquinas de estado associados aos canais de saída de uma agência. No exemplo ilustrado na figura 4.9, a agência que executará a função de processamento no canal B (agência 2) deverá transferir energia para a matéria no intuito de realizar um processo nela, enquanto que o fluxo de matéria para o local de processamento (canal B) é devido à outra agência.

Finalmente, como resultado da presente atividade, tem-se além das estruturas funcionais selecionadas, a estrutura de controle inicial do sistema em projeto. A figura 4.11 a seguir ilustra a

concepção de controle inicial do sistema, composta dos controladores locais e do sistema produto (modelos das agências). Importante ressaltar que até esta etapa do projeto ainda não foi definido o princípio de solução para cada agência da rede C/A selecionada, embora a estrutura de controle parcial já tenha sido definida. Após a seleção dos objetos físicos (mecanismos) e o detalhamento destes, obtém-se o sistema de controle completo onde as seqüências operacionais associadas a cada mecanismo serão acopladas aos sistemas produtos e controladores locais previamente obtidos.

O projetista poderá então escolher diferentes tecnologias mas mantendo a mesma estrutura física e de controle. Pode-se, então, obter uma estrutura de controle hierárquica e descentralizada, com características intrínsecas positivas como fácil manutenção, isolamento de erros e modificação na estrutura física do sistema sem alteração de toda estrutura de controle.

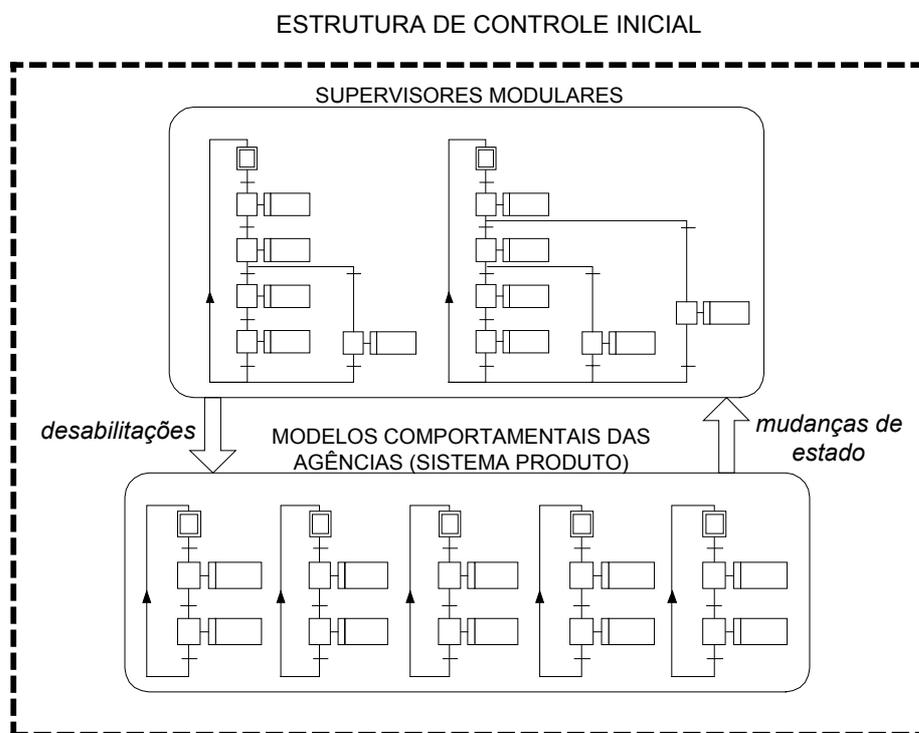


Figura 4.11 – Estrutura de controle obtida na etapa de descrição funcional.

Embora a descrição funcional proposta no presente trabalho possibilite a integração do projeto físico e de controle de forma sistemática, conforme discutido nesta seção, duas questões permanecem em aberto. A primeira questão refere-se ao modelo comportamental da agência, que é apresentado na figura 4.8 como um exemplo. Neste, considerou-se que a agência possui um canal de entrada e um de saída, sendo intuitivo e relativamente simples associar o autômato de dois estados a esta agência. Entretanto, em casos usuais, é possível encontrar agências com múltiplos

canais de entrada e saída, sendo inadequado o modelo de dois estados para tais casos. A questão que se coloca aqui é quais modelos devem ser utilizados dependendo da configuração da agência.

Também, é importante que o processo de descrição funcional conduza progressivamente e objetivamente à estrutura final do sistema físico. Dessa forma, é necessário definir um modelo em autômato que represente também a interconexão física de uma agência com os respectivos canais de entrada e saída, onde cada um destes representa um local de espera, de armazenagem ou um local onde acontecerá determinado processamento e/ou montagem. Por sua vez, de acordo com a configuração da rede C/A e do comportamento específico de cada agência, as especificações desejadas sobre os canais podem tomar diferentes representações, não sendo, por exemplo, sempre da mesma forma daquelas apresentadas na figura 4.9 para o canal B.

Assim, por se tratar de assunto relevante para o presente trabalho, na medida em que representa a formulação completa da descrição funcional do sistema em projeto (além da rede C/A), é apresentada no capítulo 5 uma base de especificações aplicáveis aos sistemas aqui tratados bem como recomendações de utilização de modelos adequados das agências. Esta base de especificações é representada no diagrama procedural de projeto apresentado na figura 4.1 como sendo um banco de dados onde o projetista coleta informações durante o projeto. Neste caso, estas informações serão acessadas durante a etapa de descrição funcional do sistema em projeto. De qualquer forma, como resultado desta etapa têm-se os seguintes modelos:

- A descrição funcional do sistema em projeto, com a rede C/A, os modelos das agências e das especificações (base de conhecimento a ser apresentada no capítulo 5);
- Estrutura de controle inicial, formada pelo Sistema Produto e pelos Supervisores Modulares.

Por fim, a sistematização desta etapa do projeto conceitual conforme apresentado nesta seção fornece uma estrutura de apoio ao projeto, onde o projetista poderá, com o conhecimento das agências, das configurações, regras de refinamento e condensação e modelos de especificações, estabelecer a estrutura de controle de modo sistemático e concomitante ao projeto físico.

#### **4.7 Estabelecimento dos princípios de solução e das seqüências operacionais correspondentes**

Conforme inicialmente discutido no capítulo 2, três importantes processos estão envolvidos na conversão do modelo de estrutura de funções em um modelo de concepção do produto: a busca por princípios de solução, a combinação destes em princípios de solução totais e o desenvolvimento destes em variantes de concepção. Nesta etapa PAHL e BEITZ (1989) recomendam a utilização da matriz morfológica para auxiliar o projetista a organizar os diversos princípios de solução para cada agência identificada e, posteriormente, auxiliar a compor todas as possíveis soluções minimizando

a desconsideração de alguma alternativa. A matriz morfológica possibilita uma análise das possíveis configurações para o sistema projetado.

A matriz morfológica leva ao modelo de princípios de solução total que, segundo FERREIRA (1997), apenas difere dos princípios de solução individuais por modelar o sistema em sua totalidade, ou seja, em todo o seu escopo. Ainda de acordo com FERREIRA (1997), o principal problema na combinação de princípios de solução é assegurar a compatibilidade física e geométrica de tais princípios que por sua vez assegure o fluxo correto de matéria e energia no sistema.

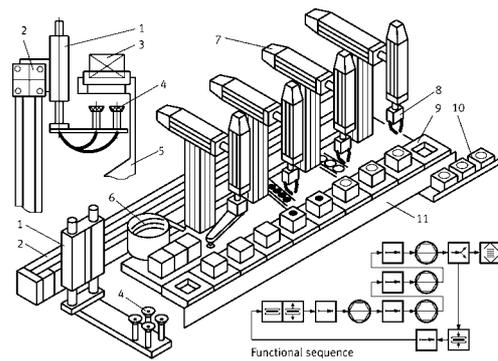
A seguir, os modelos de princípios de solução total do sistema em projeto devem ser desenvolvidos, com base nos requisitos da lista de especificações de projeto, em modelos de concepção do sistema. Este modelo é obtido através da avaliação de critérios que não foram considerados até então, como aqueles relacionados a uso, produção, custos, manutenção, entre outros, além dos critérios de natureza técnica.

A partir desta fundamentação, a seguir são apresentados os principais métodos utilizados na busca de princípios de soluções no projeto de SMMA. Podem ser identificados três métodos de busca por princípios de solução:

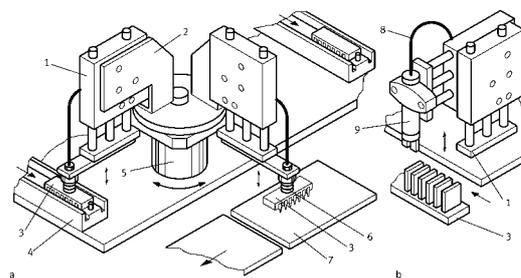
- O primeiro refere-se à seleção de soluções disponíveis em catálogos de projeto ou banco de dados que poderão representar uma função ou eventualmente um grupo de funções;
- O segundo refere-se à associação direta de uma função a um princípio de solução;
- O terceiro corresponde ao refinamento de uma determinada função, além do refinamento atual, de forma a se obterem princípios de solução para tal função (caracterizando até um novo processo de projeto).

No primeiro caso, o projetista poderá utilizar catálogos de projeto ou banco de dados de soluções nas fases iniciais e/ou intermediárias da descrição funcional. Um exemplo é ilustrado na figura 4.12, onde determinada função ou grupo de funções poderá ser realizada através de dispositivos expostos num catálogo de projeto (FESTO, 2000a). Nesse caso, o projetista analisa possíveis soluções ou tecnologias existentes para uma determinada função identificada no processo de descrição funcional.

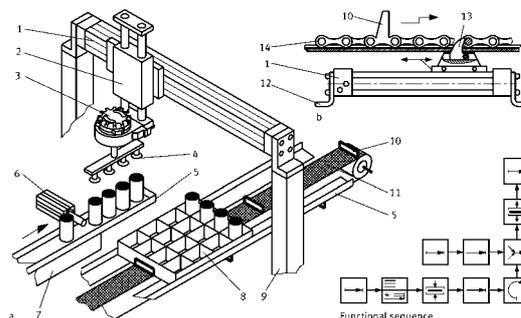
Por exemplo, para uma especificação de projeto de um sistema que envolva a operação de montagem, o projetista poderá consultar um catálogo de projetos e observar a solução mostrada na figura 4.12a, e a partir desta identificar as sub-funções e a seqüência destas e desta forma estabelecer uma estrutura funcional correspondente ou ainda uma estrutura com algumas variações. De qualquer forma, o projetista considera no processo de refinamento aquele sistema existente, optando pelo mesmo ou adaptando-o as especificações requeridas. Nota-se claramente aqui o princípio da causalidade vertical citada anteriormente (HUBKA, 1980).



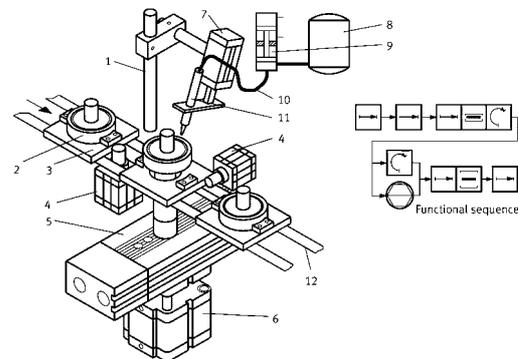
a.Montagem



b.Montagem



c.Empacotamento



d.Colagem

Figura 4.12 – Princípios de soluções para as funções: a,b)montar, c)empacotar e d)colar (FESTO, 2000a).

No segundo caso, o projetista associa diretamente cada sub-função da estrutura funcional a determinado dispositivo ou mecanismo. Nesse caso, a estrutura funcional obtida está suficientemente refinada a ponto do projetista fazer uma associação direta entre uma agência e dispositivos que a realizam. Este processo é ilustrado na figura 4.13, que representa um catálogo de soluções, onde cada função (representada por um símbolo segundo a VDI 2860) é diretamente associada a um mecanismo.

Note que neste caso o projetista já trabalha com funções mais concretas, numa fase adiantada da decomposição funcional quando comparada ao primeiro caso. A diferença é que no primeiro caso se trabalha com funções mais complexas (e princípios de solução que podem ser decompostos em partes) enquanto que no caso atual se trabalha com funções elementares e, portanto, associam-se princípios de solução mais simples.

Função	Símbolo	Exemplo do princípio	Elemento da função	Valores da função (orientativos)
Armazenar			Multivibrador	Frequência com cilindros de 12 mm de diâmetro de êmbolo: até 7 Hz (regulável)
Empilhar em depósito			Cilindros de simples e dupla ação	1 a 100 peças/min.
Introduzir (alimentar)			Cilindros de simples e dupla ação	1 a 100 peças/min. Velocidade de avanço 0,6 a 60 m/min. Curso do êmbolo 1 a 2000 mm.
Deteção de posicionamento			Sensor por contato, Sensor por reflexão, Barreira de ar	Distância máx. até 3 mm, até 4,5 mm, até 6,5 mm, até 15 mm, até 100 mm
Girar (bascular)			Cilindro giratório	Intervalo de giro 0 a 90° (regulável) 0 a 180° (regulável)

Função	Símbolo	Exemplo do princípio	Elemento da função	Valores da função (orientativos)
Sujeitar mediante força elou forma			Cilindro de simples e dupla ação. Dispositivo de fixação de peças	1 a 1000 mm, 10 a 25000 N, 20000 a 70000 N
Transportar (movimento giratório)			Mesa giratória	Deslocamento de 15, 30, 45, 60, 90 e 120°
Transportar (movimentos lineares)			Alimentador de fita. Cilindro de simples e dupla ação	Curso de 0 a 250 mm (regulável). Espessura do material até 2,0 mm
Usinar			Unidades de avanço hidro-pneumáticas	Velocidade de avanço de 30 a 6000 mm/min.
Expulsar (soprar)			Expulsores por impulso. Cilindros de simples e dupla ação	Até 480 impulsos/min. 1 a 100 peças/min.

Figura 4.13 – Princípios de soluções para diversas funções (BOLLMANN, 1997).

No terceiro caso, o projetista poderá entrar num novo processo de projeto para uma determinada função. Caso a estrutura funcional obtida seja parcialmente adequada para a síntese de soluções, no sentido de funções que necessitem de maior refinamento que outras, eventualmente torna-se necessário trabalhar de forma individual as funções em que o projetista encontre dificuldades na associação com princípios de soluções.

De fato, na maioria dos SMMA o projeto ocorre em diferentes níveis hierárquicos, onde num nível superior pode-se identificar a busca por uma configuração geral (trabalha-se com os termos ‘planta’, ‘máquina’, ‘equipamento’) e em outros níveis a busca por mecanismos que constituem ou formam tais máquinas ou dispositivos (cilindros, válvulas, guias, sensores etc). Este fato é observado em HUBKA e EDER (1988), que classificam os sistemas técnicos através do grau de

complexidade, existindo quatro grupos: I (peça, componente), II (mecanismo, sub-montagem), III (máquina) e IV (planta).

Segundo HUBKA e EDER (1988), deve-se reconhecer que os graus de complexidade são relativos dentro de cada hierarquia de um sistema técnico. Por exemplo, uma planta pode ser considerada como a totalidade de um sistema técnico para uma operação industrial, ou um grupo de sistemas técnicos (máquinas) para uma aplicação dentro de uma planta total, ou uma unidade operacional (uma máquina complexa) ou uma unidade básica (módulo operacional). Num sistema de transformação, um sistema técnico particular de baixo nível de complexidade pode ser considerado como um sub-grupo (motor elétrico), e em outro sistema de transformação ele é a finalidade (fabricante de motores).

A classificação sobre este critério indica certos limites de especialização para a atividade de projeto de engenharia, por exemplo, um engenheiro poderá lidar com o projeto de toda a planta, outro com o projeto das máquinas para a planta e um outro com o projeto de componentes elementares. De qualquer forma, a associação entre funções e princípios de solução caracteriza um dos grandes problemas apontados por diversos autores na área de projeto (PULM e LINDEMAN, 2001).

Por ser um tema já exaustivamente estudado na literatura do projeto de engenharia, e por não ser objetivo essencial desta tese, o presente trabalho não exporá métodos e contribuições para a execução ou mesmo críticas em relação aos modelos e recomendações existentes e descritas inicialmente no capítulo 2. Entretanto, é importante conceituar o termo concepção dentro do contexto de projeto tratado no presente trabalho.

O presente trabalho está contextualizado numa hierarquia de projeto de forma que a definição do que vem a ser um modelo de concepção, conforme citado anteriormente, não é adequada. As possíveis soluções para as diversas agências de uma estrutura funcional podem ser definidas, segundo HUBKA e EDER (1988), como equipamentos ou dispositivos, que por sua vez serão formados por diversas peças, atuadores e sensores. Porém, não se está interessado aqui no projeto destes componentes elementares, ao contrário, o projeto destes está fora do escopo do processo aqui tratado. Está-se interessado sim na associação de cada uma das agências a um equipamento ou dispositivo, de maneira que a combinação destes forme uma planta de engenharia (o SMMA).

Os modelos de concepção para estes casos, não têm a necessidade de apresentar detalhes quanto a formas exatas, dimensões (diâmetros, cursos dos atuadores), quantidades (número de parafusos, de sensores) e materiais. Ao contrário, o modelo de concepção parece se aproximar mais da proposta de HUBKA (1980), em que não há a necessidade de formas, dimensões ou materiais. Conforme observado em FERREIRA (1997), o modelo de concepção de HUBKA (1980) é similar ao modelo de princípio de solução total.

Como exemplo, os modelos apresentados nas figuras 4.12 podem ser considerados como uma concepção, mesmo que nestes esteja detalhado o arranjo espacial dos atuadores. Entretanto, não faz nenhuma referência à dimensão, material e quantidades, sendo que este desenho esquemático poderia estar representado num desenho a mão livre, não deixando ainda de ser um modelo de concepção.

Sob a perspectiva do projeto do sistema de controle, a partir do modelo de concepção física pode-se construir as seqüências operacionais correspondentes às agências. Foi mostrado no capítulo 3 que as seqüências operacionais modelam o comportamento dos sistemas de atuação de uma agência individual. Por sua vez, para cada uma destas agências foi obtido um modelo de concepção, sendo necessário agora estabelecer o denominado aqui modelo de concepção de seqüências operacionais.

Este modelo, de forma similar ao modelo de concepção física, não necessita ter detalhes em relação aos comandos para os atuadores ou as condições lógicas estabelecidas pelo sensoriamento do sistema. Na verdade, conforme citado, os modelos de concepção podem estar em diferentes níveis de detalhamento (por exemplo, a concepção física poderá não disponibilizar detalhes como o sensoriamento, as válvulas, dentre outros). O modelo de concepção das seqüências operacionais traduz o ordenamento do sistema de atuação daquele princípio de solução individual de determinada agência, em instruções dadas em linguagem natural.

Uma grande variedade de métodos e ferramentas tem sido desenvolvida para a elaboração do modelo conceitual das seqüências operacionais. Em qualquer um deles, os modelos são utilizados a partir de princípios de solução estabelecidos, mesmo que em diagramas iniciais abstratos ou, como comum no contexto de sistemas pneumáticos, a partir de diagramas baseados em normas técnicas (ISO1219), que também podem ser considerados modelos de concepção.

A partir destes diagramas, o projetista poderá utilizar outros diversos modelos e ferramentas, como diagramas lógicos, diagramas funcional (IEC 848), diagrama trajeto passo (BOLLMANN, 1997) ou redes de Petri. No presente trabalho, sugere-se que o projetista utilize a abordagem do método passo a passo (BOLLMANN, 1997), onde é utilizado o diagrama funcional (IEC 848) e a partir deste pode-se chegar à implementação através da pneumática, da eletropneumática ou da utilização de controladores lógicos programáveis, conforme discutido no capítulo 3.

Conforme descrito, a elaboração da seqüência operacional é realizada no momento em que se seleciona o princípio de solução para uma agência (cada uma delas possuirá uma seqüência operacional). Nesta fase, este princípio de solução geralmente poderá não fornecer um detalhamento principalmente quanto ao sensoriamento do sistema, mas um detalhamento suficiente para o projetista ter condições de elaborar a seqüência de funcionamento desejada mesmo que num nível considerado abstrato. Para exemplificar este processo, considere que numa seleção de um princípio de solução para uma agência, chegou-se a uma solução como aquela mostrada na figura

4.12d (colagem, sem considerar o sistema de transporte que seria outra agência). Apesar do desenho técnico não detalhar os sinais de detectores, a seqüência de atividades e acionamento dos atuadores poderá ser estabelecida, como mostra a figura 4.14.

Observa-se na figura 4.14 que todas as instruções do diagrama funcional relacionadas aos comandos (ações) e as condições lógicas de prosseguimento estão em linguagem natural. Obviamente, como um modelo conceitual, este diagrama funcional estará sujeito a detalhamentos nas fases posteriores de projeto, em relação aos tipos de ações, as condições iniciais, dentre outros, a medida que o processo de projeto avança. Por outro lado, o modelo de concepção das seqüências operacionais auxilia a identificação de sensores necessários no sistema físico, auxiliando assim o projeto preliminar deste.

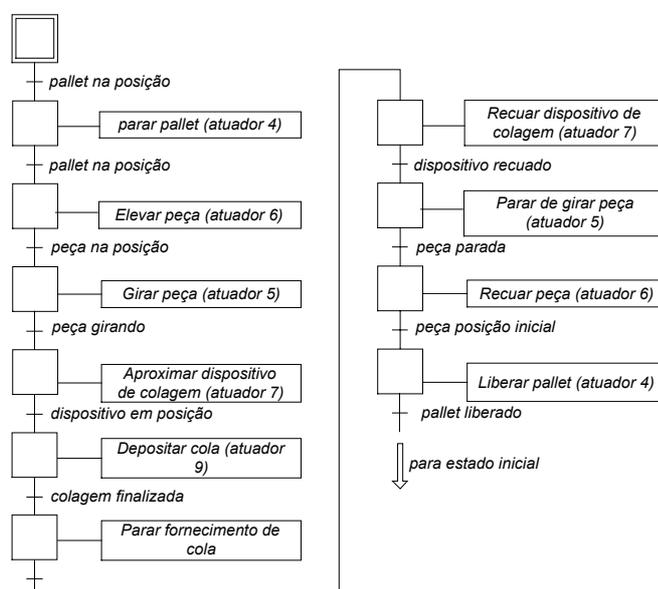


Figura 4.14 – Seqüência operacional do sistema de colagem mostrado na figura 4.12d.

Por fim, até a presente etapa os seguintes modelos devem estar definidos:

- A descrição funcional do sistema em projeto, com a rede C/A, os modelos das agências e das especificações (base de conhecimento a ser apresentada no capítulo 5);
- Estrutura de controle inicial, formada pelo Sistema Produto e pelos Supervisores Modulares.
- Modelo de concepção do sistema físico;
- Modelo de concepção das seqüências operacionais correspondentes aos princípios de solução individuais de cada agência.

#### **4.8 Revisão da estrutura funcional e acoplamento das seqüências operacionais à estrutura de controle supervísório**

A etapa de revisão da estrutura funcional implica em eventuais alterações na rede C/A em função da adequação desta aos princípios de solução selecionados e às opções de combinação destes princípios. Conforme já discutido, a estrutura funcional do SMMA projetado é um modelo que serve também ao projeto do sistema de controle, devendo então ser um documento que retrate sem ambigüidades o sistema a ser construído. Este aspecto tem como consequência a revisão da estrutura de controle, visto que alterações na rede poderão afetar os modelos das agências e das especificações.

Embora a estrutura funcional leve a um modelo de concepção e por sua vez este poderá alterar a estrutura funcional, poderá também acarretar eventuais modificações nos modelos de agências e especificações. É nesse ponto que está a justificativa da revisão da rede C/A, uma vez que as especificações estão diretamente relacionadas a esta. É possível ainda que agências individuais numa estrutura funcional tenham sido solucionadas fisicamente através de um mesmo mecanismo, sendo portanto necessário a condensação destas agências de forma a se obter uma correta descrição funcional do sistema em projeto.

Para ilustrar esta atividade, a figura 4.15 apresenta uma rede C/A onde as agências Ag1, Ag2 e Ag3 devem transferir peças do canal Cn1 até o canal Cn4. Na etapa de busca de princípios de solução, o projetista selecionou um manipulador de três eixos capaz de conduzir a peça de forma adequada entre os referidos canais. Dessa forma, essa solução deverá estar retratada na rede C/A, uma vez que as agências Ag1, Ag2 e Ag3 são realizadas por um único mecanismo, inexistindo os canais intermediários 2 e 3. Com isso, a descrição funcional é revisada, sem inclusão de especificações que na verdade não têm sentido, como por exemplo aquelas sobre os canais 2 e 3 que estavam definidas antes da revisão da estrutura funcional.

Outro ponto importante a ressaltar é sobre a simultaneidade de atividades presentes nesta etapa. Uma vez que as seqüências operacionais só são possíveis de serem obtidas a partir de um modelo de concepção física, parece incoerente obtê-las antes da revisão da estrutura funcional. Porém, é preciso atentar-se ao fato que o projeto, apesar de ter seu modelo procedural em passos, em alguns momentos existe a execução simultânea de atividades. No caso aqui tratado, a revisão da estrutura funcional é realizada no momento do estabelecimento dos princípios de solução, sendo que não tem sentido pensar-se em revisão do modelo conceitual das seqüências operacionais.

Em outras palavras, a construção das seqüências operacionais se dá após a obtenção do modelo de concepção física, mesmo que seja após uma revisão funcional. Como as seqüências operacionais são determinadas pelos modelos das agências individuais, é preciso que a estrutura em rede C/A siga corretamente o modelo de concepção.

A seguir, a partir do modelo de concepção das seqüências operacionais e da estrutura de controle até aqui obtida (sistemas produto e supervisores locais), pode-se então elaborar a estrutura de controle conceitual do SMMA, acoplando os dois modelos obtidos. Seguindo os modelos apresentados no capítulo 3 e a orientação metodológica do presente trabalho, a documentação resultante desta fase segue o formato de diagramas funcionais (IEC 848).

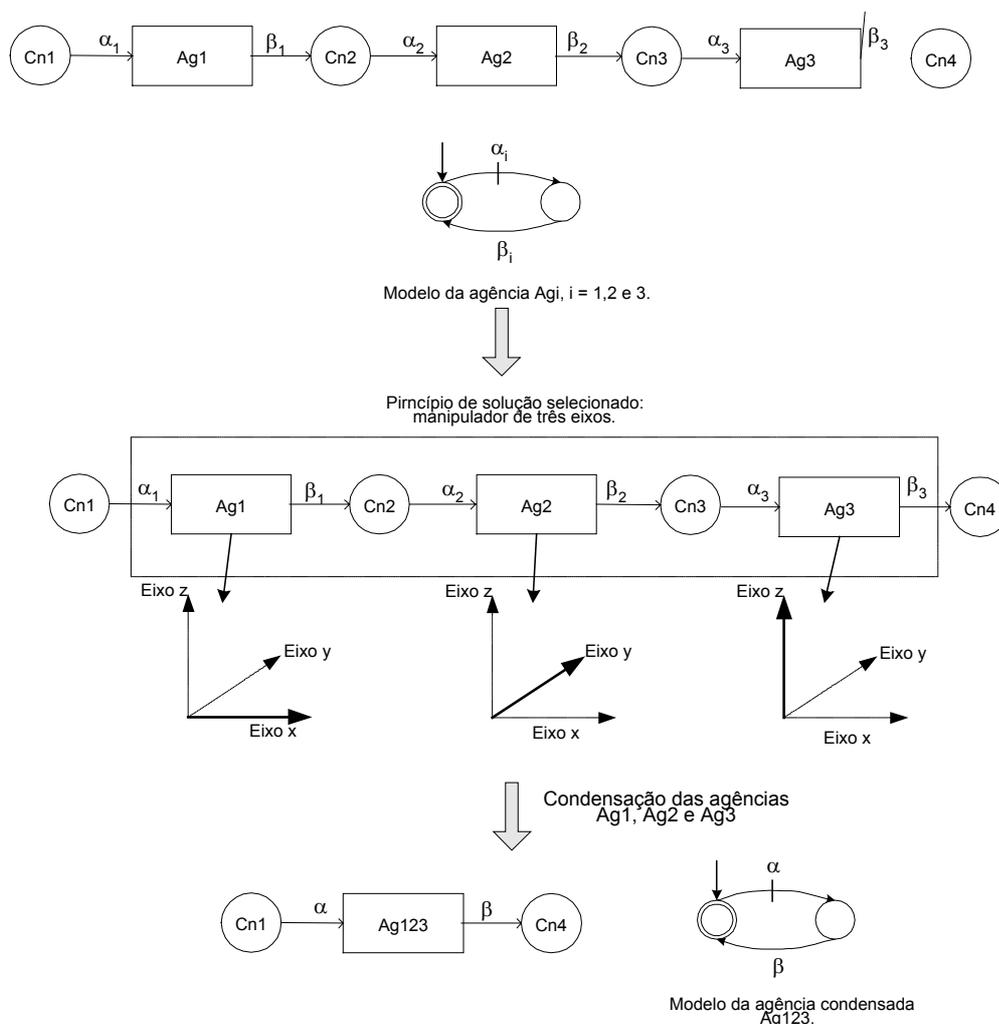


Figura 4.15 – Exemplo do processo de revisão funcional.

Conforme a proposta apresentada por QUEIROZ et al. (2001) discutida no capítulo 3, o acoplamento das seqüências operacionais se dá com o sistema produto, este último comandando o início do primeiro. As seqüências operacionais, observando os sinais de entrada do CLP e ajustando os sinais de saída, executa os ciclos de funcionamento de cada dispositivo ou equipamento. O sistema produto representa o modelo da agência, sendo a interface da estrutura de controle supervisorio com o sistema real. Esta estrutura é ilustrada na figura 4.16, onde a seqüência

operacional mostrada na figura 4.14 é agora acoplada ao sistema produto (correspondente à agência que tem por objetivo realizar a colagem).

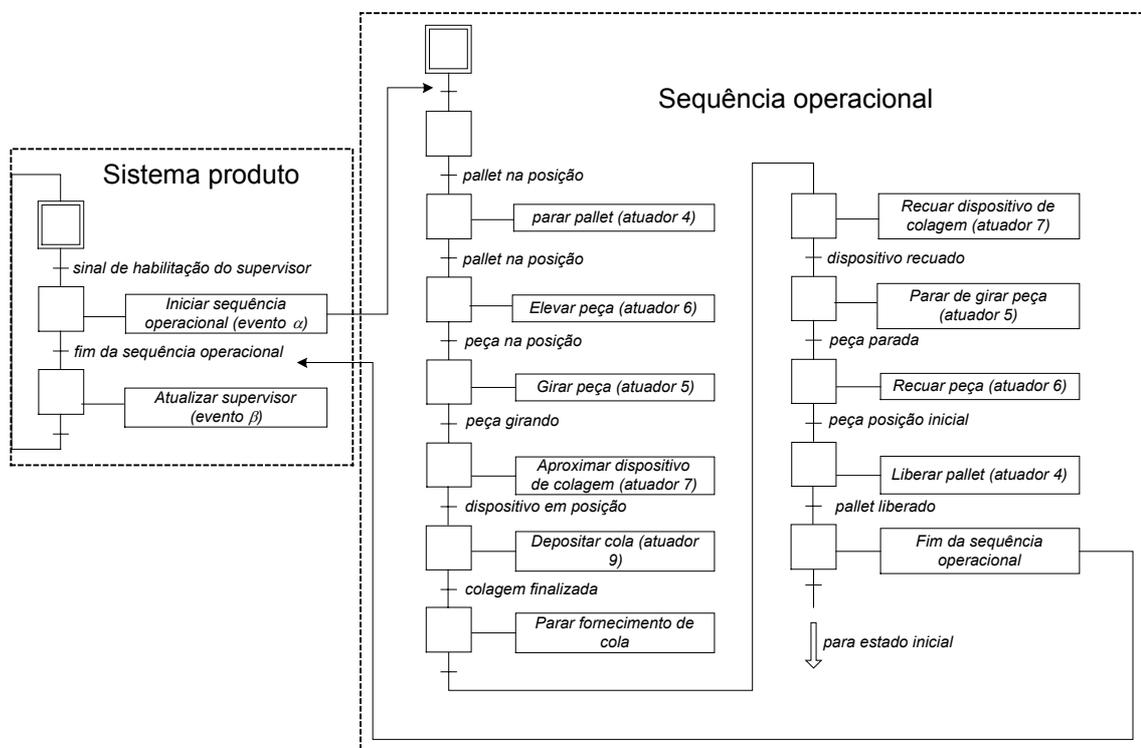


Figura 4.16 – Acoplamento da seqüência operacional com o sistema produto, correspondente ao exemplo mostrado na figura 4.15.

Há de se ressaltar que na fase de projeto conceitual as informações relacionadas a esta etapa são consideradas preliminares, ou uma concepção, a ser detalhada na fase seguinte. Os documentos obtidos nesta etapa são em forma de diagramas funcionais, passíveis de alterações e adições e posteriormente como documentação básica para a elaboração do programa no CLP selecionado. A tarefa já é facilitada caso o CLP escolhido possibilite a programação em diagrama de funções (IEC 848), caso contrário, é recomendável a utilização do método passo a passo para a obtenção do programa em diagrama escada.

Finalmente, têm-se os seguintes modelos ao final desta etapa do projeto conceitual:

- A descrição funcional revisada do sistema em projeto, com a rede C/A, os modelos das agências e das especificações (base de conhecimento a ser apresentada no capítulo 5);
- Estrutura de controle, formada pelo Sistema Produto e pelos Supervisores Modulares.
- Modelo de concepção do sistema físico;
- Modelo de concepção das seqüências operacionais correspondentes aos princípios de solução individuais de cada agência acoplada ao sistema produto.

Para ilustrar o resultado do projeto conceitual proposto é apresentada a figura 4.17 onde são mostrados todos os modelos obtidos, representando dessa forma a concepção do SMMA.

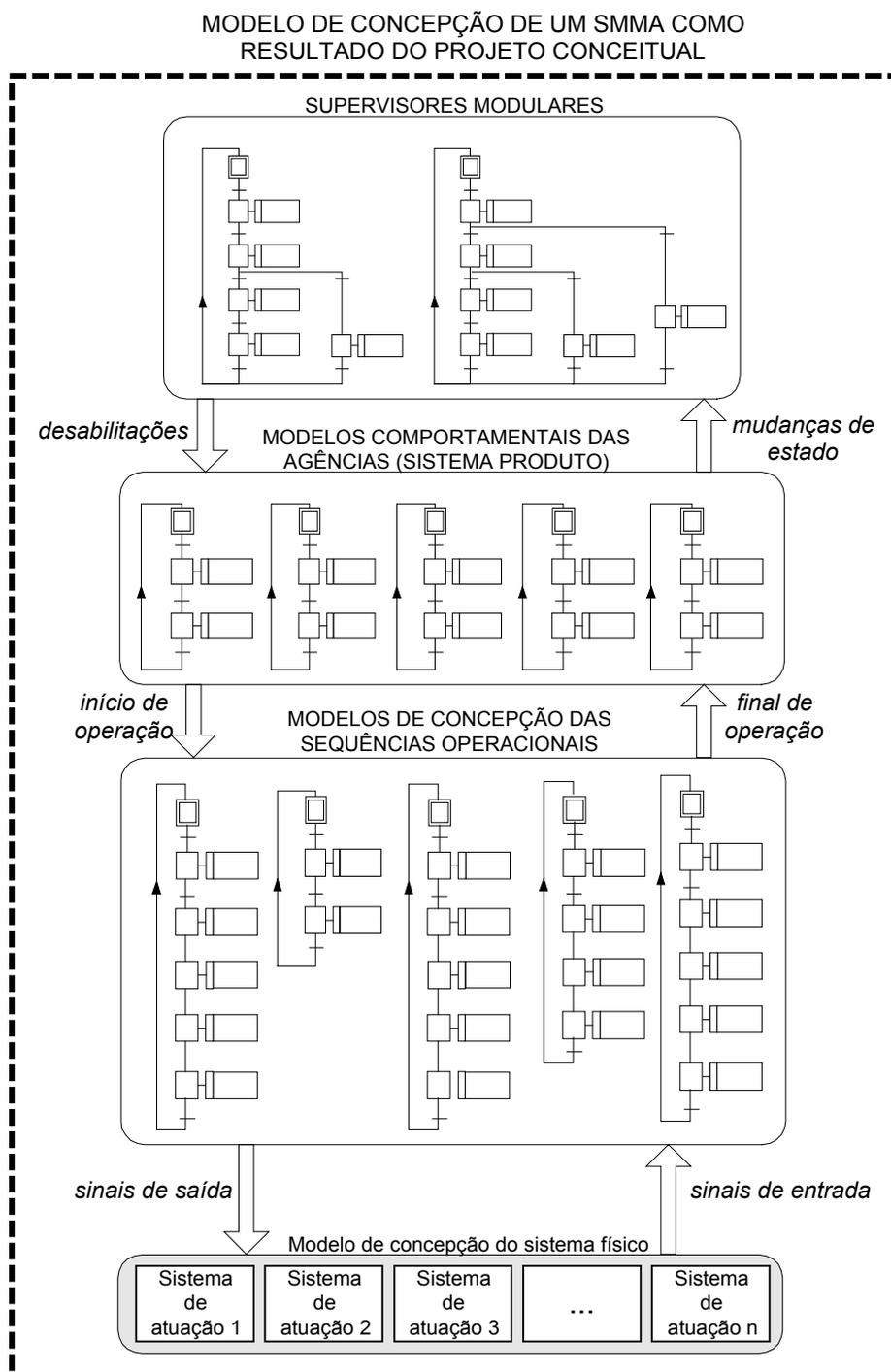


Figura 4.17 – Modelo representando o resultado do projeto conceitual.

## 4.9 Conclusão

O presente capítulo apresentou a sistematização do projeto conceitual de SMMA, detalhando as principais etapas e atividades que caracterizam o processo de projeto. O foco principal da metodologia apresentada é a integração do projeto físico com a parte de controle, sendo a descrição funcional proposta do sistema em projeto a ferramenta essencial de suporte. A partir dos fundamentos apresentados nos capítulos 2 e 3, com destaque a rede C/A e a teoria de controle supervisão, mostrou-se como inserir na descrição funcional as três perspectivas (funcional, estrutural e comportamental) fundamentais para atingir um projeto integrado.

O modelo procedural apresentado na seção 4.1 apresenta as atividades relacionadas tanto à parte física como à parte de controle. Pode-se perceber que tal modelo é fortemente baseado na visão da escola alemã, onde o processo de projeto conceitual é iniciado a partir de uma especificação de projeto (elaborada no projeto informacional), possui duas atividades fundamentais (descrição funcional e busca por princípios de solução) e tem como resultado um modelo de concepção que servirá como base ao projeto preliminar.

O capítulo apresentou também os métodos utilizados comumente na busca por princípios de soluções. De acordo com os métodos apresentados, pode-se inferir que a maioria dos projetos para os sistemas tratados no presente trabalho é predominantemente adaptativa (não original). A existência de catálogos de soluções apresentando sistemas complexos formados por diversos dispositivos mostra que a atividade de projeto está mais identificada com a adaptação de soluções existentes.

A inclusão de atividades relacionadas ao projeto do sistema de controle diferencia a metodologia aqui proposta daquelas discutidas no capítulo 2. A metodologia apresentada visa dar suporte ao projetista no que diz respeito à execução das atividades concomitantes. Estas atividades fazem parte da descrição funcional proposta e dessa forma a integração do projeto físico e de controle se dá nesta etapa. A seção 4.6 apresenta a descrição funcional proposta, onde um sistema em projeto é descrito através da rede C/A, inserindo a perspectiva estrutural e a funcional, e os modelos em autômatos representando o comportamento das agências e as especificações esperadas no canal de interesse.

Embora no presente capítulo sejam detalhadas as etapas e atividades do projeto conceitual, viu-se que é necessário estabelecer uma base ou grupo de modelos das agências e das especificações relacionadas a SMMA. Será esse o tema do capítulo seguinte.

## 5. ESPECIFICAÇÕES OPERACIONAIS ASSOCIADAS A SMMA

De acordo com o modelo proposto por RAMADGE e WONHAM (1989) apresentado no capítulo 3, a síntese de controle pressupõe um modelo adequado para as especificações de comportamento do sistema. No contexto de projeto de SMMA, estas especificações são definidas por um conjunto de restrições sobre os canais que por sua vez determinam a operação coordenada das agências. Ainda, o modelo RW estabelece que a lógica de controle deve ser ótima, no sentido de restringir o comportamento das agências somente o necessário para que não violem as especificações impostas aos canais.

Conforme discutido inicialmente no capítulo 4, a base de especificações operacionais aplicáveis a SMMA completa a descrição funcional. Após a construção da rede C/A e a modelagem comportamental das agências, é necessário então investigar os possíveis conjuntos de especificações que expressem os efeitos requeridos nos canais, de forma que a função do sistema em projeto seja alcançada. Ainda, de acordo com a abordagem utilizada para tratar estes sistemas (modelo RW) as especificações são expressas em termos de autômatos.

A tarefa de construir um autômato apropriado que represente cada uma das especificações de um determinado sistema não é tarefa simples e requer certa experiência na modelagem de SEDs. CASSANDRAS E LAFORTUNE (1999) propõem técnicas para representar em autômatos as especificações em linguagem natural que são comuns na prática. Tais autores classificam os modelos de especificações em quatro grupos: estados proibidos, divisão de estados, alternância de eventos e sub-cadeias proibidas, onde em cada um deles uma técnica de modelagem é aplicada.

Embora esta classificação de uma certa forma generalize as classes de especificações, ainda persiste o problema de construí-las ou adaptá-las aos sistemas aqui tratados. De uma maneira geral, mostrar-se-á ao longo deste capítulo que as especificações operacionais variam de acordo com a configuração (ou estrutura) do sistema em projeto, acarretando uma dificuldade a mais na atividade de projeto de SMMA.

O problema descrito no parágrafo anterior é assunto do presente capítulo. De maneira geral, torna-se necessário dispor ao projetista (provavelmente não especialista na modelagem de SEDs) de SMMA métodos de construção de autômatos que representem as especificações operacionais do sistema. Sob a ótica de automação dessa etapa do projeto, seja na disponibilidade de modelos ou na inclusão destes em ferramentas de suporte ao projetista, propõe-se aqui elaborar grupos de especificações que realizam os diversos requisitos operacionais nos sistemas tratados.

Assim, neste capítulo são detalhadas as atividades descritas no capítulo 4 que tratam da modelagem do sistema e das especificações operacionais. Explorando-se as configurações possíveis em SMMA, apresentam-se as especificações operacionais associadas. Nesse sentido, diversos aspectos são levantados e discutidos.

### 5.1 Modelo Genérico de Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizados

Conforme descrito no capítulo 1, os SMMA consistem de múltiplas estações de trabalho (que executam processamento de peças ou montagem de partes) que são interligadas através de um sistema de transporte ou manipulação que transfere peças de uma estação para a próxima. Dessa forma, um modelo genérico para tais sistemas, utilizando a rede C/A, pode ser construído conforme mostra a figura 5.1. As agências rotuladas na figura 5.1 ( $ag_1, \dots, Ag_{2N+1}$ ) representam uma possível configuração de um SMMA (pode-se dizer a configuração mais elementar), enquanto as linhas tracejadas tanto nas agências como nos canais representam possíveis junções, bifurcações, ramificações ou realimentações ocorridas em tais sistemas. Dessa forma, pode-se concluir a diversidade de configurações possíveis para tais sistemas.

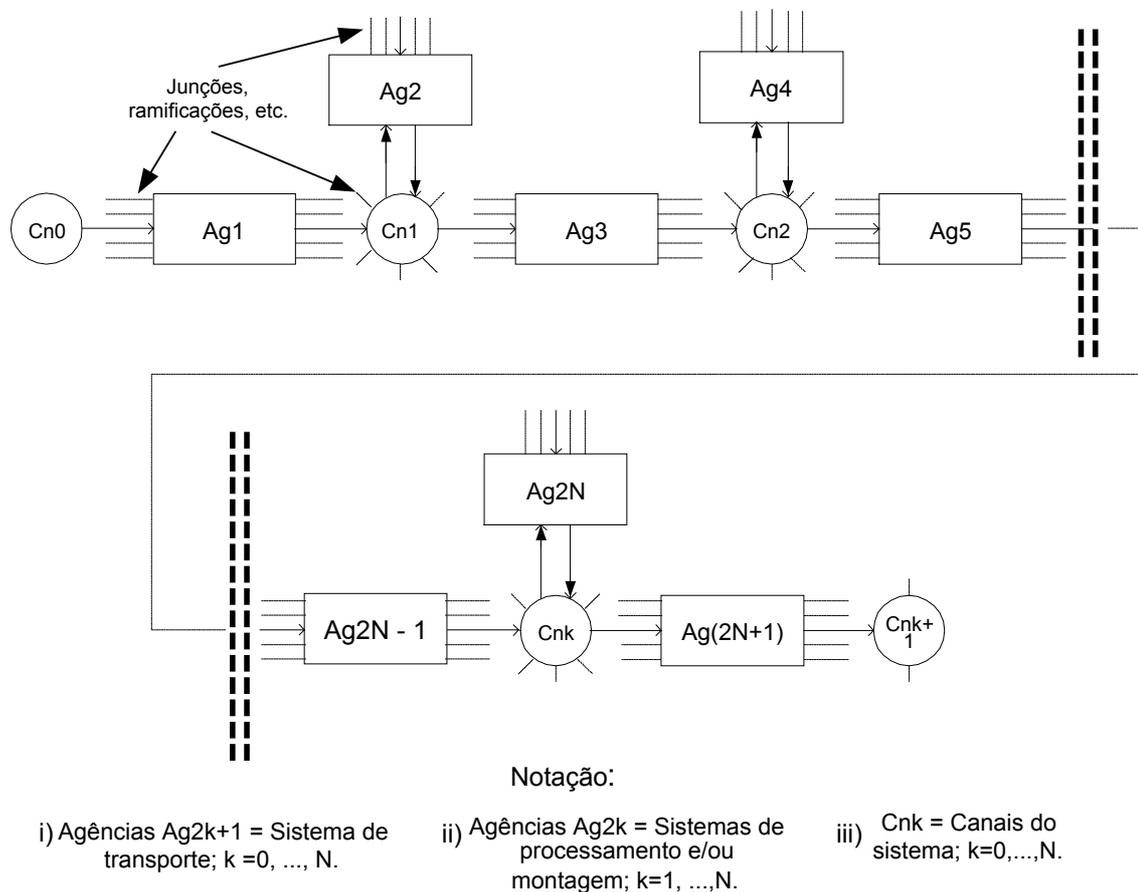


Figura 5.1 Modelo genérico de um SMMA.

O modelo genérico apresentado na figura 5.1 mostra que as possibilidades de configurações são ilimitadas. A questão que se coloca é: dada uma configuração qualquer, é possível obter de forma sistemática o conjunto de modelos das especificações operacionais que representem de forma

adequada o comportamento desejado? A resposta para esta pergunta caracteriza a proposta do presente capítulo. Apesar do número elevado de configurações possíveis, observa-se que tais sistemas possuem um comportamento desejado similar: o sistema de manipulação deverá servir as estações de processamento e/ou montagem de forma adequada sob o ponto de vista do fluxo de peças ou partes e de segurança operacional.

Nesse sentido, é necessário inicialmente explorar as configurações e o funcionamento dos sistemas de manipulação, visando estabelecer um grupo de especificações relacionadas à correta operação destes. Em seguida, as variações relacionadas às especificidades de agências ou as configurações (junções, ramificações, dentre outras) são analisadas de forma a completar o arcabouço de especificações operacionais de SMMA's.

Para o estudo proposto, algumas hipóteses são adotadas objetivando a simplificação dos modelos das agências e das especificações:

- Os canais possuem sempre capacidade unitária, existindo no máximo uma peça num mesmo canal esperando a atividade correspondente a este canal;
- Uma atividade é executada em uma única peça por vez;
- Mesmo que uma atividade (exceto a atividade de transporte) retire a peça do canal correspondente este ainda é considerado ocupado. O canal é considerado desocupado somente quando a agência de transporte retira uma peça ou parte deste;
- Somente as agências de manipulação ou transporte são consideradas no esvaziamento e enchimento dos canais.

## 5.2 Modelagem das agências

Conforme a metodologia apresentada no capítulo 4, depois de selecionadas as estruturas funcionais, as agências e especificações são estabelecidas de forma a obter-se a completa descrição funcional do sistema em projeto. O problema inicial é qual ou quais modelos devem ser utilizados para representar o comportamento das agências. Na verdade, propõe-se definir um modelo em autômato que represente também a interconexão física de uma agência com os respectivos canais de entrada e saída, onde cada um destes representa um local de espera, de armazenagem ou um local onde acontecerá determinado processo e/ou montagem.

Utilizando a notação da rede C/A, uma configuração genérica de uma agência é apresentada na figura 5.2, onde é mostrado que podem existir  $n$  canais de entrada e  $j$  canais de saída. Os eventos  $\alpha$  e  $\beta$  são introduzidos de modo a representar a captura e o depósito ou entrega das peças ou partes nos canais de entrada e saída, respectivamente.

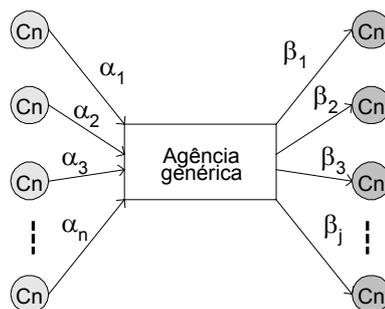


Figura 5.2 – Configuração de uma agência genérica.

As possibilidades de modelagem da configuração mostrada na figura 5.2 são inúmeras, visto o número de variantes possíveis. Para ilustrar esse fato, a figura 5.3 apresenta alguns exemplos de agências com certos números de canais de entrada e saída e seus respectivos modelos em autômatos. Observa-se ainda que podem ser criados inúmeros modelos para representar as agências mostradas na figura 5.3, principalmente em virtude dos seguintes aspectos:

- Ordem de captura e depósito das peças;
- Repetição de um evento (caracterizando mais de uma captura ou depósito em determinado canal).

A figura 5.3 ilustra os eventos relacionados à retirada de peças dos canais (eventos  $\alpha$ ) que são considerados controláveis, ou seja, passíveis de desabilitação pelo supervisor (ver capítulo 3). Por sua vez, os eventos relacionados ao depósito de peças são considerados não controláveis e, portanto, impossíveis de serem desabilitados. Esta hipótese pressupõe que, após a agência iniciar sua atividade, não é mais possível desabilitar ou interromper tal tarefa. Em outras palavras, qualquer possibilidade de não ativação de determinada agência deverá ser realizada pela desabilitação do evento de entrada (no presente trabalho estes eventos estão representados pelo símbolo  $\alpha$ ). Esta hipótese é seguida durante o decorrer do presente trabalho.

É fácil perceber que muitos modelos poderão ser criados dependendo da estrutura funcional obtida e também dos aspectos citados no parágrafo anterior. Num primeiro momento poder-se-ia pensar que estas inúmeras possibilidades de modelagem dariam poder de criação ao projetista, uma vez que este teria total liberdade em estabelecer modelos para as diversas agências. Entretanto, entende-se aqui que este fato acarreta um aumento da complexidade na descrição funcional, uma vez que torna a atividade de modelagem menos sistemática. Além de eventualmente o projetista conceber modelos inadequados às agências, restringindo ou superdimensionando seus comportamentos, a atividade de síntese de controladores ficaria também prejudicada em termos de sistematização.

Uma vez que o processo de síntese envolve a modelagem das agências e, caso o projetista tenha liberdade de modelagem, é possível que o número elevado de estados dos controladores modulares obtidos aumente consideravelmente a sua construção, implementação e operação em decorrência da seleção de modelos inadequados de agências. Por outro lado, a utilização de um modelo em autômato único para as agências, que as represente de forma simples e não restritiva, é recomendável para alcançar um nível adequado de sistematização da descrição funcional.

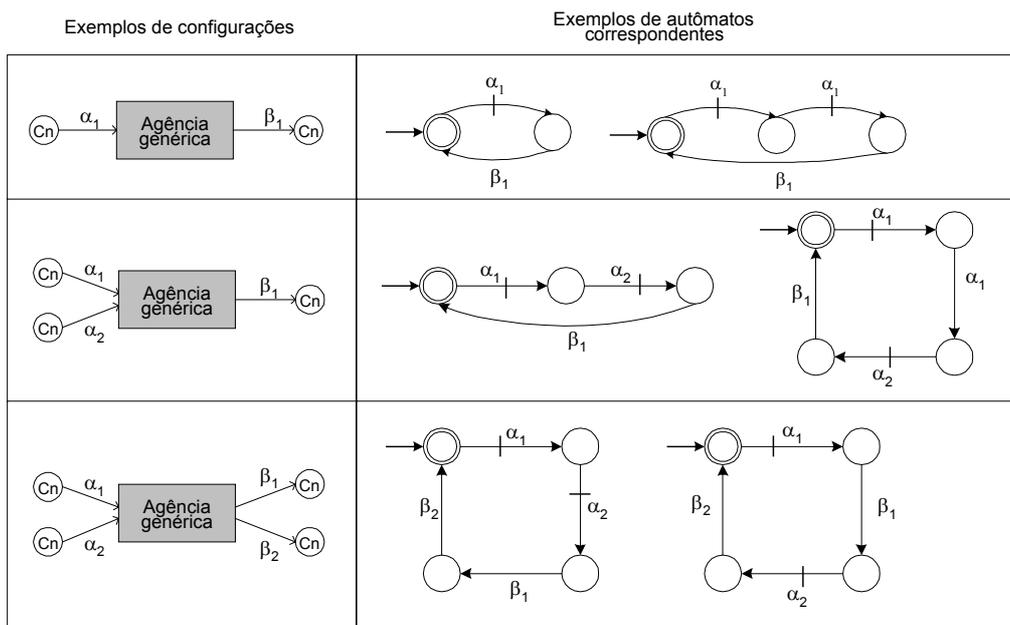


Figura 5.3 – Exemplos de configurações de agências e respectivos modelos em autômatos.

Diante destes argumentos, o presente trabalho propõe utilizar um único modelo em autômato para representar as agências na atividade de descrição funcional. O modelo utilizado será aquele de dois estados, um estado inicial significando que a agência está inativa e um segundo estado significando que a agência está em atividade. Ainda, para as agências de manipulação ou transporte (que transferem as peças ou partes de um canal a outro), a transição de estado inativo para ativo (evento  $\alpha$ ) acarreta a retirada de matéria do canal de entrada, enquanto a transição do estado ativo para o inativo (evento  $\beta$ ) acarreta o depósito de matéria no canal de saída da respectiva agência. O caso de agências com múltiplos canais de entrada e saída será analisado no decorrer desta seção.

As agências responsáveis por processos, montagens ou medição não necessariamente têm este comportamento, ou seja, podem executar as atividades sem necessariamente retirar a matéria do canal. De qualquer forma, os eventos  $\alpha$  e  $\beta$  possuem significados similares para ambos os casos, início e fim de operação da agência correspondente. O citado modelo é apresentado na figura 5.4.

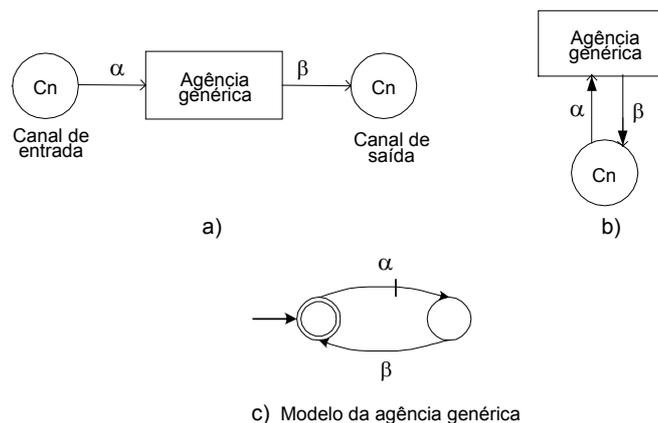


Figura 5.4 – Modelo em autômato utilizado para representar as agências na atividade de descrição funcional.

A modelagem das agências apresentada na figura 5.4 mostra que não existe diferenciação entre aquelas que executam a atividade retirando a matéria do canal – caso (a) (por exemplo, aquelas realizáveis por sistemas de transporte ou determinados processos) ou aquelas que realizam a operação sem retirar a matéria do canal (caso geral dos processos e montagem) – caso (b). O modelo correspondente em autômato mostra através do evento  $\alpha$  que a atividade iniciou, sendo o início caracterizado pela retirada ou não da matéria no canal. Por outro lado, o evento  $\beta$  representa o fim da atividade, sendo esta caracterizada ou não pelo depósito da peça num determinado canal. Na verdade, aquelas atividades que são executadas sem a retirada da matéria do canal correspondem ou a processos que transferem energia para a matéria (processos de fixação, de modificação de forma e superfície, dentre outros).

Entretanto, existem situações que impossibilitam a utilização do modelo de dois estados conforme apresentado na figura 5.4. É o caso, por exemplo, quando existem na estrutura funcional agências equivalentes sem canais de interligação comum. Neste caso, tais agências realizam suas atividades sobre os seus canais de entrada e saída, porém tais atividades são realizadas de forma independente entre os canais. A figura 5.5 ilustra este caso, onde as agências equivalentes Ag1 são modeladas por um autômato de três estados. Os eventos  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  relacionam-se com a retirada e depósito de matéria nos canais Cn1 e Cn2, respectivamente. Já os eventos  $\alpha_{11}$  e  $\beta_{11}$  representam a retirada e depósito da matéria nos canais Cn3 e Cn4, respectivamente. Nota-se que a ocorrência de tais eventos causa efeitos nos canais citados de forma independente.

Como exemplo ilustrativo, pode-se pensar numa agência que tem por objetivo fornecer peças brutas ou partes a um SMMA e que esta mesma agência também é responsável pela retirada dos produtos finais. Nesse caso, podem ser identificados dois modos de operação: o primeiro de

fornecimento e o segundo de retirada (caracterizando os dois estados ativos do autômato da figura 5.5). O modelo mais adequado a estes casos é o apresentado na figura 5.5.

Em termos de implementação física, a figura 3.3 apresentada no capítulo 3 mostra um pequeno SMMA que tem como mecanismo de fornecimento de peças brutas e retirada de peças usinadas um atuador pneumático de dois eixos, que serve as duas operações. Note que neste caso existe um canal comum entre as agências de depósito de peças brutas e retirada de peças acabadas, entretanto não há efeitos simultâneos, sendo também adequado para representar tal agência o modelo da figura 5.5.

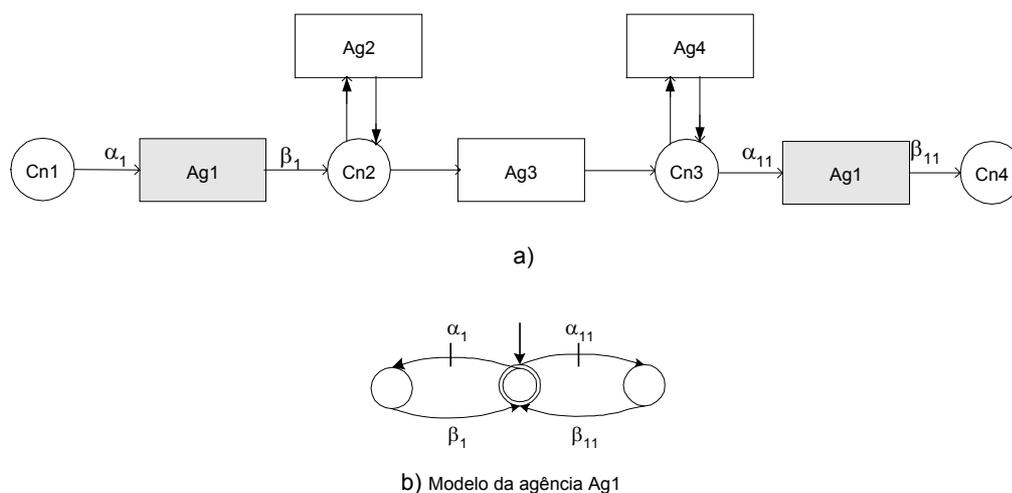


Figura 5.5 – Modelo em autômato utilizado na representação de agências similares, sem canais em comum.

Porém, quando as agências equivalentes são identificadas como interconectadas, ou seja, possuindo canais comuns de ligação (ver figura 4.6), o modelo de dois estados apresentado na figura 5.4 pode ser utilizado, visto que a mesma agência afeta todos os canais de saída simultaneamente. Desta forma, as agências equivalentes neste caso são modeladas por um único autômato, representando o comportamento simultâneo de todas elas. Neste caso as agências equivalentes devem estar todas interconectadas através dos canais, ou seja, sem nenhuma agência de ligação entre elas (a figura 5.5 mostra agências equivalentes com uma agência de ligação entre elas).

Tratando ainda sobre a modelagem de agências, pode-se verificar que alguns efeitos podem ser produzidos através de sistemas de atuação (recebendo sinais do sistema de controle para execução) ou exclusivamente por processamento energético-material (não recebem informação para serem ativadas). No segundo caso, a chegada de matéria no canal de entrada é condição suficiente para a

manifestação do efeito no canal, sem nenhuma restrição ou possibilidade de desabilitação deste efeito.

Como exemplo ilustrativo, considere uma agência que deverá transferir peças de um determinado ponto a outro do sistema. Pode-se selecionar um mecanismo composto de diversos atuadores e sensores que, executando uma determinada seqüência de movimentos definidos pelo programa de controle (troca de informações com o controlador), transferem a peça de acordo com o especificado. Por outro lado, a mesma transferência de peças pode ser realizada através de algum dispositivo que não necessite de informações para realizar sua função, como por exemplo, uma rampa em que as peças são transportadas por gravidade.

A questão para tais casos é: qual o modelo mais adequado para representar os aspectos citados? Propõe-se aqui que a agência que tem este comportamento (permanentemente habilitada) deve ser condensada à agência imediatamente anterior, aquela que é responsável pelo depósito da matéria no canal onde a primeira está acoplada. A figura 5.6 a seguir ilustra o processo de condensação de agências permanentemente habilitadas. Esta ação é baseada no fato que a teoria de controle supervisorio discutida no capítulo 3 tem como um dos fundamentos a ação de controle através da desabilitação de eventos. Conseqüentemente, a desabilitação de uma agência que não troca informações com o controlador deve se dar a partir da desabilitação da agência imediatamente anterior.

Na figura 5.6, o evento considerado até então controlável  $\alpha_2$  passa agora a ser considerado um evento não controlável. Após a decisão de implementar a agência Ag2 como uma agência permanentemente habilitada, é necessário que o projetista realize a condensação com a agência anterior, conforme descrito no parágrafo anterior.

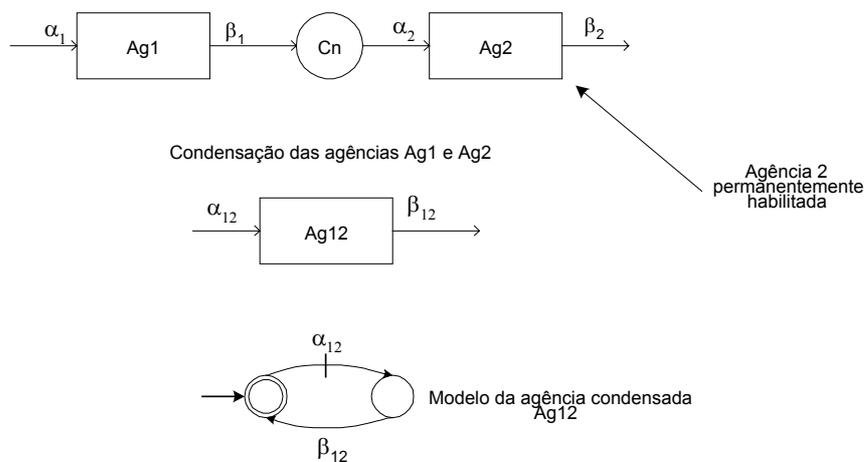


Figura 5.6 – Condensação de agência permanentemente habilitada.

Algumas agências correspondentes a sistemas de medição se enquadram nesta classificação, visto que não existe fluxo de informações vindo do sistema de controle (não existe o comando, existe o envio de informação). Por exemplo, uma agência de medição de determinado atributo poderá ser implementada através de sensores posicionados no canal correspondente, de forma que a função seja realizada sem a necessidade de troca de informações com o sistema de controle. A chegada de peça no referido canal é condição suficiente para a medição.

Uma questão remanescente em relação aos modelos das agências é como tratar situações onde uma determinada agência tenha mais de uma entrada e/ou saída. Caso o projetista alcance uma estrutura funcional onde existem agências com junções ou ramificações, como tratá-las? Como modelar tais agências, já que nesses casos o autômato de dois estados é inadequado? Para ilustrar esta importante questão, a figura 5.7 a seguir apresenta uma estrutura funcional de um sistema em projeto. Nesta figura, observa-se que as agências Ag0 e Ag3 possuem mais de uma entrada e as agências Ag1 e Ag7 mais de uma saída.

Recomenda-se no presente trabalho que as agências que possuem mais de uma entrada e/ou saída sejam refinadas até o ponto em que se possa utilizar o modelo em autômato de dois estados anteriormente descrito. Na figura 5.7, por exemplo, o projetista refina as agências Ag0, Ag1, Ag3 e Ag7 de forma a alcançar um modelo de agência de uma entrada e uma saída, possibilitando assim a utilização do modelo genérico de dois estados. O projetista então identifica novos canais e agências que podem surgir a partir da decomposição das agências com junções e/ou ramificações.

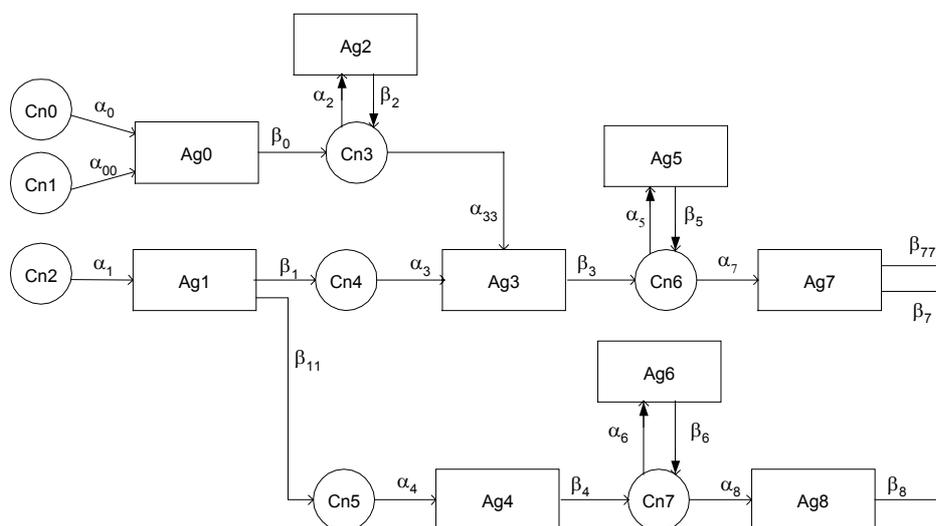


Figura 5.7 – Estrutura funcional formada por agências com junções e ramificações.

O modelo refinado da estrutura apresentada na figura 5.7 e que poderá utilizar o autômato de dois estados para todas as agências é mostrado na figura 5.8, onde se pode observar os novos canais e agências. Estes por sua vez conduzem a uma estrutura funcional a ser formada apenas por

modelos básicos de agências e conseqüentemente à utilização de um único modelo em autômato. Dessa forma, a descrição funcional é executada de forma sistemática, já que a busca por modelos mais refinados naturalmente conduz a uma aproximação de uma solução física. Por sua vez, a síntese dos supervisores tende a ser mais simples devido à utilização de um modelo simples em autômato (situação dependente ainda do problema tratado).

De acordo com a figura 5.8, a técnica de refinar as agências até se obter um modelo de uma entrada e uma saída acarreta o surgimento de canais com múltiplas entradas e saídas. Dessa forma, toda a complexidade perdida quando da decomposição das agências se traduz na criação de novos canais com um número maior de entradas e saídas. Por esta razão, é necessário buscar modelos que representem também os eventos que afetam os canais, sendo que tais modelos caracterizam os efeitos esperados nestes canais. Tais modelos representam as especificações operacionais do sistema em projeto, tema que é explorado na seção seguinte.

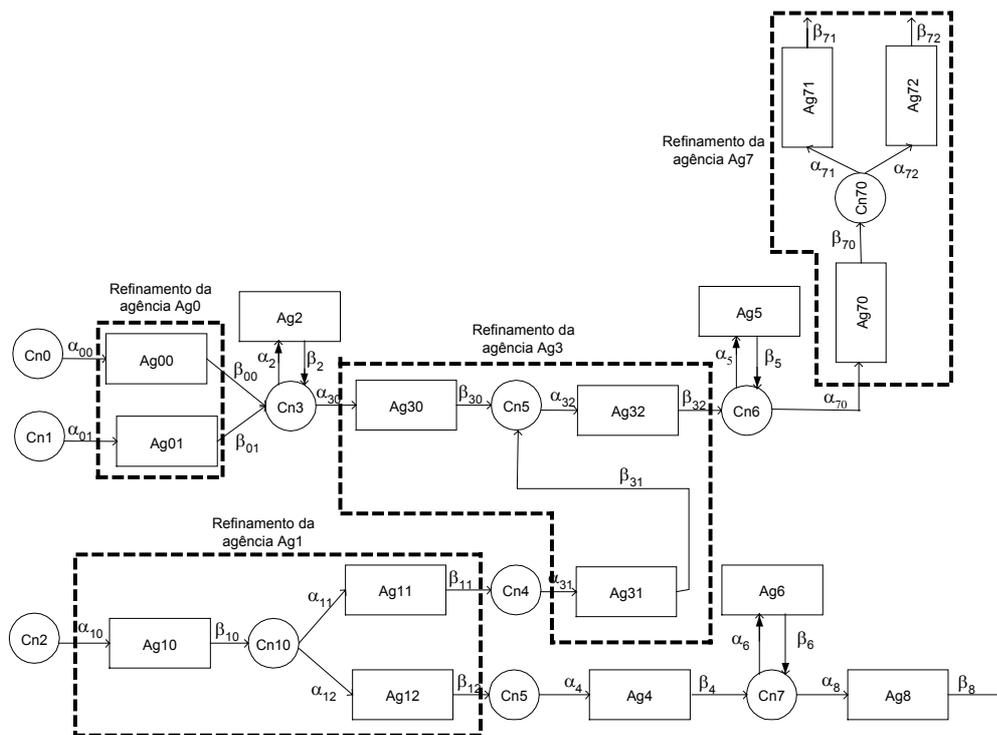


Figura 5.8 – Estrutura funcional refinada a partir daquela apresentada na figura 5.7.

Enfim, proposto o modelo genérico em autômato para a representação do comportamento das agências de uma estrutura funcional (além daqueles casos específicos descritos), é necessário agora completar a descrição funcional do sistema em projeto. Reportando-se à figura 5.8, após a obtenção da estrutura funcional e do modelo em autômato que representa o comportamento das agências, a complementação da descrição funcional é estabelecida quando as especificações sobre os canais

forem modeladas. Conforme discutido anteriormente, são estas especificações que impõem restrições sobre o comportamento das agências de forma que os efeitos nos canais sejam cumpridos e a função do sistema alcançada.

A seção seguinte apresenta o principal grupo de especificações operacionais aplicáveis a SMMA's.

### **5.3 Especificações relacionadas ao sistema de manipulação ou transporte**

Conforme já discutido (ver capítulo 4, seção 4.6), a descrição funcional proposta no presente trabalho está de acordo com a abordagem de CHANDRESEKARAN (1995), onde este estabelece o comportamento desejado, isto é, as funções, como especificações sobre as portas externas (no presente caso, sobre os canais) que influenciam o meio. Nos sistemas aqui tratados, apesar de poder-se aplicar esta abordagem, mostrar-se-á que as configurações possíveis das agências alteram o modo de estabelecer as especificações sobre os canais de interligação destas. Em outras palavras, não existe um modelo único de especificação sobre os canais, ao contrário, estes modelos devem levar em conta a estrutura do sistema (tipos de agências) de forma a alcançar um objetivo comum que é realizar o correto fluxo de matéria no SMMA projetado. De qualquer forma, as especificações sobre os canais definem ou restringem o comportamento das agências.

Nesta seção são apresentadas as configurações possíveis em relação às agências que realizam a manipulação ou transporte, onde é mostrado que as variantes destas agências alteram sistematicamente o modelo das especificações sobre os canais. Na verdade, o comportamento desejado do SMMA projetado é alcançado principalmente sobre restrições no sistema de manipulação, já que são estes que determinam o fluxo de matéria nos canais.

#### **5.3.1 Especificações operacionais utilizando transportadores assíncronos**

Segundo GROOVER (2001), existem dois tipos possíveis de transporte em SMMA's: o assíncrono e o síncrono. O primeiro é caracterizado pela independência do transporte entre estações, ou seja, existem mecanismos distintos que transferem peças de uma estação a outra. Ao contrário, o síncrono é caracterizado por um único transportador, onde ao mover-se uma peça de uma estação a outra, as demais peças são simultaneamente transferidas para as estações subsequentes. Os mecanismos mais comuns que são definidos como transportadores síncronos são as esteiras e as mesas giratórias.

Um SMMA utilizando um sistema assíncrono é modelado de acordo com a figura 5.9. Cada transportador ( $Ag1$  e  $Ag3$ ) é modelado por um autômato de dois estados, caracterizando dois mecanismos distintos. A especificação  $E1$  garante a não ocorrência de *overflow* e *underflow* do

canal  $Cn2$ ; a especificação  $E2$  garante que a peça é processada (ou montada) após a chegada no canal correspondente; a especificação  $E3$  garante que a peça só é retirada do canal de processamento ou montagem após o final de operação destas atividades.

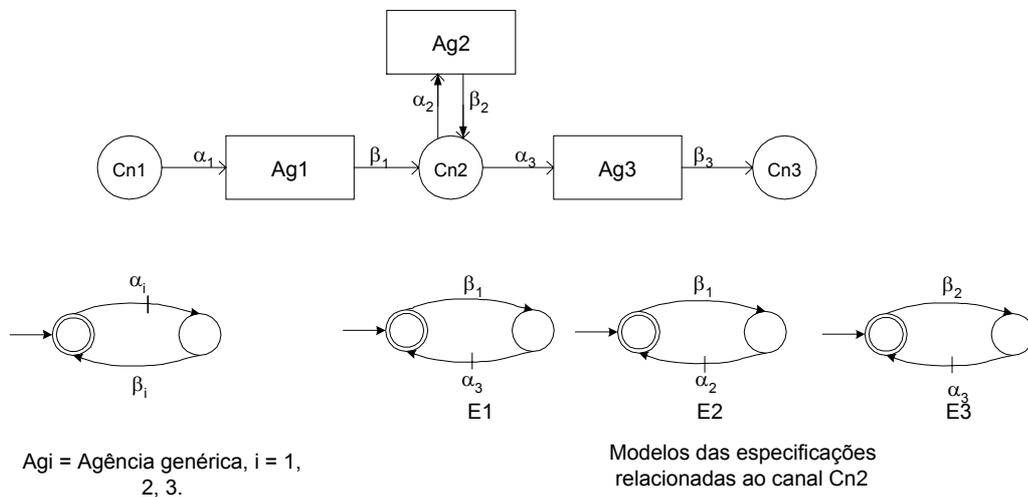


Figura 5.9 Modelos de especificações correspondentes a um SMMA com transportador assíncrono.

De acordo com a aplicação do controle modular local, as plantas locais são obtidas através da composição dos subsistemas que compartilham eventos com suas respectivas especificações  $E1$ ,  $E2$  e  $E3$ . Os seguintes geradores são então obtidos:  $G_{loc,1} = Ag1 \parallel Ag3$ ,  $G_{loc,2} = Ag1 \parallel Ag2$  e  $G_{loc,3} = Ag2 \parallel Ag3$ . As especificações locais são obtidas através da composição síncrona das especificações genéricas  $E1$ ,  $E2$  e  $E3$  com suas respectivas plantas locais:  $E_{loc,1} = E1 \parallel Lm(G_{loc,1})$ ,  $E_{loc,2} = E2 \parallel Lm(G_{loc,2})$  e  $E_{loc,3} = E3 \parallel Lm(G_{loc,3})$ .

É possível então calcular as máximas linguagens controláveis contidas em  $E_{loc,j}$  ( $j=1,2,3$ ), isto é,  $SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j})$ . Por meio de uma ferramenta computacional adequada (por exemplo, o programa TCT) (WONHAM, 1998), pode-se verificar que as especificações controláveis são localmente modulares, isto é, pode-se calcular e verificar a igualdade de  $\overline{SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j})}$  e  $\overline{SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j})}$ . Assim, a modularidade garante que não há nenhuma perda de eficiência entre esta solução modular apresentada e a melhor solução centralizada (QUEIROZ e CURY, 2000a).

Num SMMA formado por várias estações de trabalho utilizando transportadores assíncronos, o projetista deverá compor as plantas locais de acordo com as especificações genéricas de cada canal, sintetizar as especificações locais e encontrar as máximas linguagens controláveis correspondentes. Por fim, verificar a modularidade dessas linguagens. Dessa forma, caso um SMMA seja configurado através da sucessiva composição do modelo apresentado na figura 5.9, chega-se a um

modelo genérico como apresentado na figura 5.10. O mesmo grupo de especificações genéricas mostrado na figura 5.9 pode ser definido para cada um dos canais do SMMA formado. O indexador  $i$  define o canal no qual estão definidas as especificações.

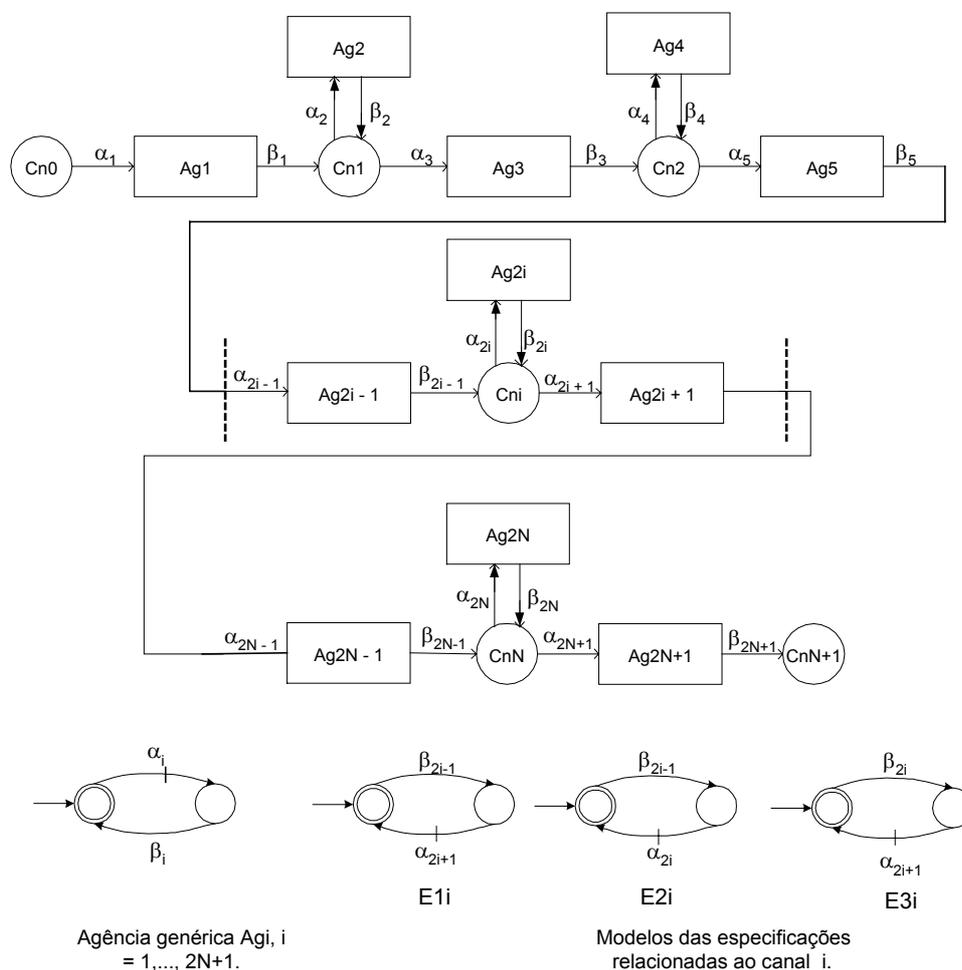


Figura 5.10 – SMMA genérico com transportador assíncrono e correspondentes modelos de especificações.

Pode-se em seguida definir o seguinte grupo de plantas locais, especificações genéricas, especificações locais e respectivas máximas linguagens controláveis correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.10. Estas informações são mostradas na tabela 5.1. A última linha da tabela 5.1 mostra a expressão para a verificação da modularidade, que necessita ser provada para um número específico de canais presentes numa determinada configuração.

Tabela 5.1 Informações gerais sobre o PCS, a síntese e a modularidade.

Especificações locais	Plantas Locais	Especificações locais	Máxima linguagem controlável
$\underline{E1i}$	$G_{loc,1i} = Agi \parallel Agi+2$	$E_{loc, 1i} = E1i \parallel Lm (G_{loc,1i})$	$SupC (E_{loc,1i}, G_{loc, 1i})$
$\underline{E2i}$	$G_{loc,2i} = Agi \parallel Agi+1$	$E_{loc, 2i} = E2i \parallel Lm (G_{loc,2i})$	$SupC (E_{loc,2i}, G_{loc, 2i})$
$\underline{E3i}$	$G_{loc,3i} = Agi+1 \parallel Agi+2$	$E_{loc, 3i} = E3i \parallel Lm (G_{loc,3i})$	$SupC (E_{loc,3i}, G_{loc, 3i})$
Verificar $\parallel SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j}) = \parallel SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j}), j \in \{1i, \dots, 1i, 2i, \dots, 2i, 3i, \dots, 3i\}$ .			

### 5.3.2 Especificações operacionais utilizando transportador síncrono

Conforme mencionado, o transporte síncrono é caracterizado pela movimentação simultânea de peças entre as estações. Em outras palavras, ao mover-se uma peça de uma estação a outra, as demais peças são simultaneamente transferidas para as estações subseqüentes. Esta característica acarreta modificações nas especificações operacionais do sistema em projeto, conforme descrito a seguir.

Um SMMA utilizando um sistema síncrono, com ocorrência de atividade no canal intermediário (canal servido pelo transportador síncrono) e com mecanismos de fornecimento e de retirada de peças distintos é ilustrado pela rede C/A da figura 5.11. Nesta figura é mostrado o modelo de todas as agências que compõem o SMMA com o sistema de transporte síncrono. As agências sombreadas ilustram que as atividades serão implementadas pelo mesmo princípio de solução, de acordo com a classificação apresentada no capítulo 4. Considera-se que uma agência sempre realizará o fornecimento e a retirada de matéria da linha considerada. Desta forma a configuração de um modelo com transporte síncrono terá sempre agências assíncronas nas extremidades.

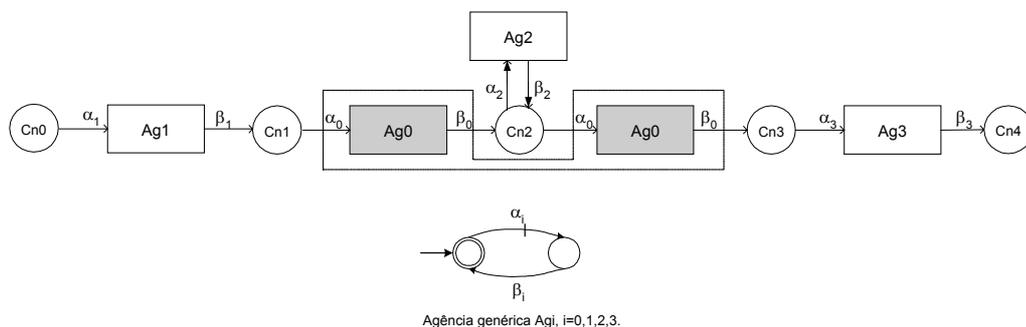


Figura 5.11 – Modelo em rede C/A correspondente a um SMMA com transportador síncrono e autômato genérico das agências.

Os modelos das especificações para este tipo de configuração foram inicialmente apresentados por QUEIROZ et al. (2001), que trata do controle de uma mesa giratória com algumas estações de trabalho. A modelagem das especificações do sistema ilustrado na figura 5.11 é mostrada na figura 5.12. A especificação  $Ea$  previne a retirada de peças em um dos canais  $Cn1$  (sem presença de peça) ou  $Cn2$  (sem peça processada por  $Ag2$ ). As especificações  $Ebi$  impedem o transportador síncrono de funcionar enquanto a estação de trabalho ( $Ag2$ ) e/ou os sistemas de transporte assíncronos das extremidades ( $Ag1$  e  $Ag3$ ) estão sendo executados. Dessa forma, a especificação  $Ea$  atua sobre os canais  $Cn1$  e  $Cn2$  enquanto as especificações  $Ebi$  atuam sobre os canais  $Cn1$ ,  $Cn2$  e  $Cn3$ .

O fluxo correto de peças no SMMA através do transportador síncrono ( $TS$ ) é obtido pelas especificações  $Eci$ . A especificação  $Eci$  modela o correto fluxo de peças entre o canal 1 (início da ramificação com  $TS$ ) e o canal 2 (estação de trabalho da ramificação com  $TS$ ). Para tal, evita sobrepor peças ou partes em  $Cn1$ , processar ou montar sem matéria em  $Cn2$  e executar o transporte sem a realização da atividade relacionada à agência  $Ag2$ . A especificação  $Ec2$  impede a realização de duas atividades consecutivas pela agência  $Ag2$ , acionar o transporte assíncrono (agência  $Ag3$ ) sem matéria em  $Cn2$  e acionar a agência  $Ag0$  com peça em  $Cn3$  (ver figura 5.4). Nota-se que cada uma destas especificações atua sobre dois canais consecutivos (por exemplo,  $Eci$  atua sobre os canais  $Cn1$  e  $Cn2$ ).

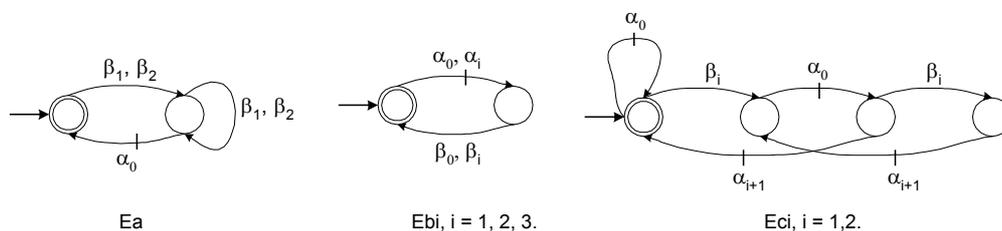


Figura 5.12 – Modelos de especificações correspondentes a um SMMA com transportador síncrono.

As plantas locais são obtidas através da composição dos subsistemas que compartilham eventos com suas respectivas especificações  $Ea$ ,  $Ebi$  e  $Eci$ . Os seguintes geradores são então obtidos:  $G_{loc,a} = Ag0 \parallel Ag1 \parallel Ag2$ ;  $G_{loc,bi} = Ag0 \parallel Agi$ ,  $i = 1, 2, 3$  e  $G_{loc,ci} = Ag0 \parallel Agi \parallel Agi+1$ ,  $i = 1, 2$ . As especificações locais são obtidas através da composição síncrona das especificações genéricas  $Ea$ ,  $Ebi$  e  $Eci$  com suas respectivas plantas locais:  $E_{loc,a} = Ea \parallel Lm(G_{loc,a})$ ;  $E_{loc,bi} = Ebi \parallel Lm(G_{loc,bi})$  e  $E_{loc,ci} = Eci \parallel Lm(G_{loc,ci})$ .

Calculam-se então as máximas linguagens controláveis contidas em  $E_{loc,a}$ ,  $E_{loc,bi}$  e  $E_{loc,ci}$ , isto é,  $SupC(E_{loc,a}, G_{loc,a})$ ,  $SupC(E_{loc,bi}, G_{loc,bi})$  e  $SupC(E_{loc,ci}, G_{loc,ci})$ . Por meio de uma ferramenta computacional adequada e para  $j \in \{a, b1, b2, b3, c1, c2\}$ , pode-se verificar que as especificações

controláveis são localmente modulares, isto é, pode-se calcular e verificar a igualdade de

$$\| \overline{SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j})} \| \text{ e } \| \overline{SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j})} \|.$$

Caso o SMMA seja configurado de tal forma que existam diversas estações de trabalho servidas pelo transportador síncrono, pode-se generalizar o modelo apresentado na figura 5.11 para o modelo ilustrado na figura 5.13. Da mesma forma, as agências sombreadas representam a execução funcional através do mesmo mecanismo (transportador síncrono).

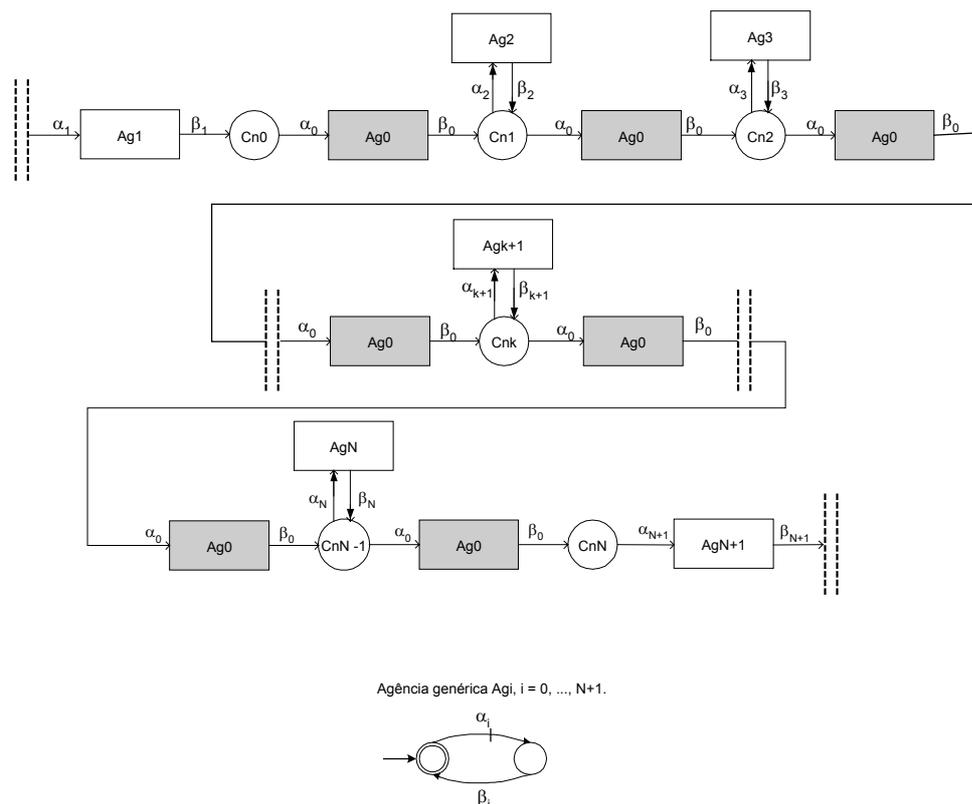


Figura 5.13 – Modelo genérico de um SMMA com transportador síncrono servindo diversas estações de trabalho.

A figura 5.14 apresenta os modelos das especificações genéricas para o sistema apresentado na figura 5.13. O indexador  $k$  corresponde ao canal onde está sendo executada alguma atividade, dessa forma o canal 1 ( $Cn1$ ) corresponde à agência 2 ( $Ag2$ ) que realiza a primeira atividade.

Pode-se em seguida generalizar o seguinte grupo de plantas locais, especificações genéricas, especificações locais e respectivas máximas linguagens controláveis correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.13. Estas informações são mostradas na tabela 5.2.

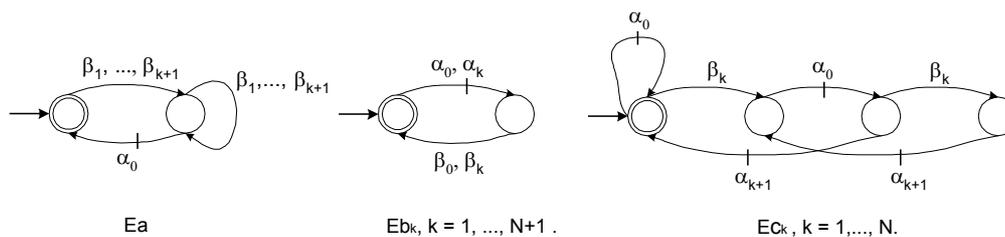


Figura 5.14 – Especificações genéricas para o sistema apresentado na figura 5.6.

Tabela 5.2 – Informações gerais sobre o Problema de Controle Supervisório (PCS), a síntese e a modularidade correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.6.

Especificações genéricas	Plantas locais	Especificações locais	Máximas linguagens controláveis
Ea	$G_{loc,a} = Ag0 \parallel Ag1 \parallel \dots \parallel Agk+1$	$E_{loc,a} = Ea \parallel Lm(G_{loc,a})$	$SupC(E_{loc,a}, G_{loc,a})$
Ebk	$G_{loc,bk} = Ag0 \parallel Agk, k = 1, \dots, N+1.$	$E_{loc,bk} = Ebk \parallel Lm(G_{loc,bk})$	$SupC(E_{loc,bk}, G_{loc,bk})$
Eck	$G_{loc,ck} = Ag0 \parallel Agk \parallel Agk+1, k = 1, \dots, N.$	$E_{loc,ck} = Eck \parallel Lm(G_{loc,ck})$	$SupC(E_{loc,ck}, G_{loc,ck})$
Verificar $\parallel SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j}) = \parallel SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j})$ , onde $j \in \{a, b1, \dots, b_{N+1}, c1, \dots, cN\}$ .			

### 5.3.3 Especificações operacionais utilizando transportador síncrono e canal sem atividade

A primeira variante do modelo apresentado na figura 5.11 é caracterizada pela existência de um canal onde nenhuma atividade é prevista, como o modelo representado na figura 5.15. Essa configuração torna-se necessária em razão de dois aspectos: restrição física ou previsão de tempo de atraso de transferência de peças de uma estação a outra. O primeiro caso pode ser ilustrado pela figura 3.3 (ver capítulo 3), onde é mostrada uma mesa giratória de quatro posições para execução de dois processos de usinagem. A disposição vertical da mesa impede a colocação de um mecanismo no terceiro canal (ou terceira posição da mesa giratória), caracterizando assim a inexistência de atividade no mesmo.

A previsão de tempo de atraso de transferência de peças é necessária quando existem certos tipos de processos previstos para o SMMA. A peça, após sofrer tal (is) processo (s), necessita aguardar determinado intervalo de tempo antes de chegar à próxima estação de trabalho. Dessa forma, faz-se a previsão de canal intermediário (canal servido pelo transportador síncrono) entre as duas estações de trabalho.

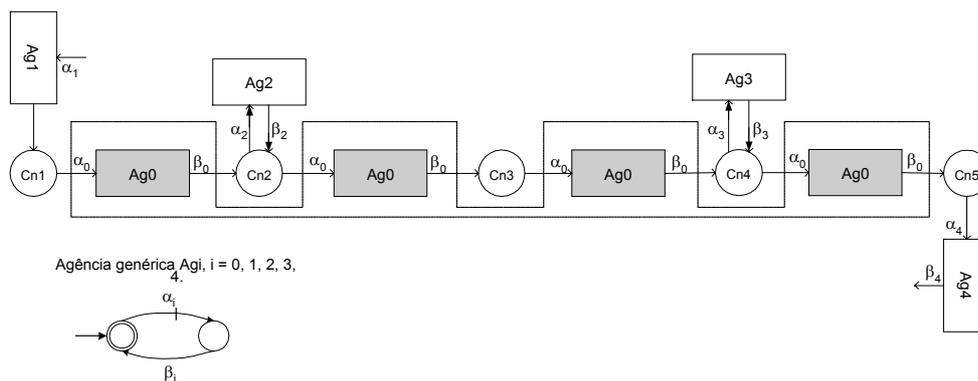


Figura 5.15 – Representação de um SMMA com transporte síncrono e um dos canais sem atividade.

A existência de um canal sem atividade altera de forma substancial a modelagem das especificações de operação do SMMA, quando comparadas àquelas mostradas na figura 5.14. O aspecto essencial a ser observado é que não existirá mais um evento sinalizando o fim de operação de atividades (evento  $\beta$ ) no canal intermediário (ver especificações *Eck* da figura 5.14). Assim, o fluxo de peças não poderá ser modelado canal a canal como mostrado na figura 5.14, mas no caso atual deverá-se considerar o fluxo de peças entre os dois canais adjacentes ao canal intermediário (sem atividade).

A figura 5.16 apresenta as novas especificações de operação de SMMA com transporte síncrono e sem atividade em um dos canais. O autômato *Ea* modela a especificação que garante que a agência equivalente (sombreada na figura 5.14, representando TS) não seja ativada a toa, ou seja, sem uma atividade estar concluída. O autômato *Ebi* modela a especificação de exclusão mútua entre as operações de processamento ou montagem e o sistema de transporte. O autômato *Eci* modela o correto fluxo de peças entre os canais que tem atividade sendo executadas. O autômato *Ec2* modela o fluxo de peças entre os canais adjacentes àquele sem atividade.

Pode-se notar claramente que a inclusão de canal sem atividade acarreta o crescimento do número de estados dos modelos das especificações (*Ea* e *Ec2*), o que por sua vez aumenta o esforço computacional do processo de síntese e verificação da modularidade entre controladores, além de aumentar o tamanho do supervisor correspondente. A alternativa proposta neste trabalho no sentido de evitar a explosão combinacional no número de estados (agrava-se à medida que canais sem atividade vão sendo acrescentados à linha) é criar um sinal interno que sinalize que a peça chegou ao canal sem atividade e está pronta para deixá-lo (já que não existe nenhuma atividade relacionada). O objetivo desta estratégia é utilizar a mesma estrutura de especificação no caso de canais com atividades (no caso *Ea* e *Eck* apresentadas na figura 5.14).

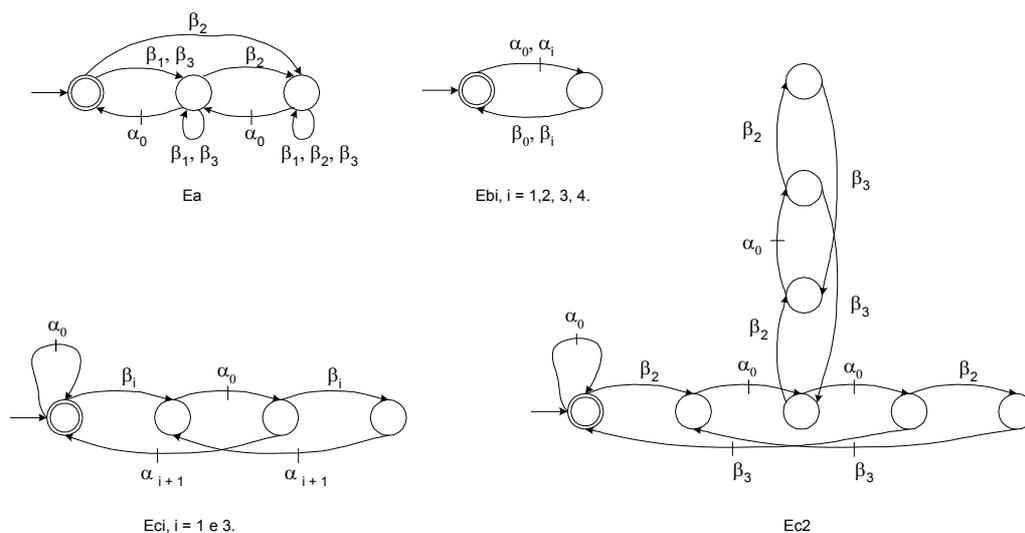


Figura 5.16 – Modelos de especificações do SMMA ilustrado na figura 5.15.

A solução proposta então é associar a cada canal sem atividade um autômato de estado único com um evento controlável em *selfloop*. Esse evento sinaliza que a peça chegou ao canal e está pronta para ser transferida à próxima estação ou a outro canal sem atividade. Dessa forma, resolve-se o problema da falta de sinalização para o fim de uma atividade possibilitando utilizar a mesma estrutura de especificação apresentada na figura 5.14 (*Eck*).

O novo grupo de especificações para o SMMA mostrado na figura 5.16 é apresentado na figura 5.17, onde o modelo do gerador de sinal no canal sem atividade é representado pelo autômato  $P_i$ . Em relação às especificações apresentadas na figura 5.14, as seguintes diferenças podem ser apontadas: aparece uma nova especificação de exclusão mútua entre o gerador de sinal  $P_i$  e o transportador síncrono ( $Eb2'$ ); surgem as especificações  $Ec2'$  e  $Ec2''$ , além das que também constam deste modelo ( $Ec1$  e  $Ec3$ ). As especificações  $Ec2'$  e  $Ec2''$  garantem o correto fluxo de peça entre os canais 1 e 2 e 2 e 3, respectivamente.

A especificação  $Ec2'$  impede a repetição da atividade pela agência 2, a sinalização ( $\delta_2$ ) sem matéria processada pela agência 2 e a execução do transporte pela agência  $Ag0$  antes da sinalização ( $\delta_2$ ). A especificação  $Ec2''$  impede a sinalização consecutiva da mesma matéria no canal  $Cn2$ , impede a ativação da agência  $Ag3$  sem matéria em  $Cn3$  e impede o acionamento do transporte com matéria não processada pela agência  $Ag3$  em  $Cn3$  (ver figura 5.15).

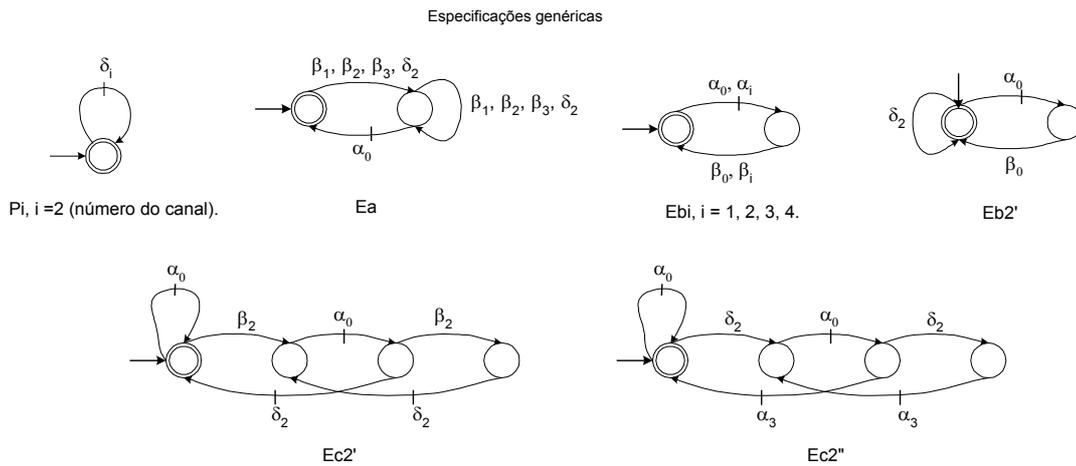


Figura 5.17 – Especificações do SMMA ilustrado na figura 5.15 com inclusão de um gerador de sinal no canal sem atividade.

As plantas locais são obtidas através da composição dos subsistemas que compartilham eventos com suas respectivas especificações  $Ea$ ,  $Ebi$ ,  $Eb2'$ ,  $Eci$ ,  $Ec2'$  e  $Ec2''$ . Os seguintes geradores são então obtidos:  $G_{loc,a} = Ag0 \parallel Ag1 \parallel Ag2 \parallel Ag3 \parallel P2$ ;  $G_{loc,bi} = Ag0 \parallel Agi$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $G_{loc,b2'} = Ag0 \parallel P2$ ;  $G_{loc,ci} = Ag0 \parallel Agi \parallel Agi+1$ ,  $i = 1, 3$ ;  $G_{loc,c2'} = Ag0 \parallel Ag2 \parallel P2$  e  $G_{loc,c2''} = Ag0 \parallel P2 \parallel Ag3$ . As especificações locais são obtidas através da composição síncrona das especificações genéricas  $Ea$ ,  $Ebi$ ,  $Eb2'$ ,  $Eci$ ,  $Ec2'$  e  $Ec2''$  com suas respectivas plantas locais:  $E_{loc,a} = Ea \parallel Lm(G_{loc,a})$ ;  $E_{loc,bi} = Ebi \parallel Lm(G_{loc,bi})$ ;  $E_{loc,b2'} = Eb2' \parallel Lm(G_{loc,b2'})$ ;  $E_{loc,ci} = Eci \parallel Lm(G_{loc,ci})$ ;  $E_{loc,c2'} = Ec2' \parallel Lm(G_{loc,c2'})$  e  $E_{loc,c2''} = Ec2'' \parallel Lm(G_{loc,c2''})$ .

Calculam-se então as máximas linguagens controláveis contidas em  $E_{loc,a}$ ,  $E_{loc,bi}$ ,  $E_{loc,b2'}$ ,  $E_{loc,ci}$ ,  $E_{loc,c2'}$  e  $E_{loc,c2''}$ , isto é,  $SupC(E_{loc,a}, G_{loc,a})$ ,  $SupC(E_{loc,bi}, G_{loc,bi})$ ,  $SupC(E_{loc,b2'}, G_{loc,b2'})$ ,  $SupC(E_{loc,ci}, G_{loc,ci})$ ,  $SupC(E_{loc,c2'}, G_{loc,c2'})$  e  $SupC(E_{loc,c2''}, G_{loc,c2''})$ . Por meio de uma ferramenta computacional adequada e para  $j \in \{a, b1, b2, b2', b3, b4, c1, c3, c2', c2''\}$ , pode-se verificar que as especificações controláveis são localmente modulares, isto é, pode-se calcular e verificar a igualdade de  $\overline{SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j})}$  e  $\overline{SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j})}$ . Além disso, pode-se provar que os supervisores encontrados quando se utilizam as especificações apresentadas na figura 5.16 são equivalentes aos encontrados quando da utilização do evento auxiliar (sinal interno) e especificações associadas (figura 5.17).

Os eventos de sinalização  $\delta$  são gerados sempre que habilitados, sem nenhuma interface com uma estrutura de controle de nível mais baixo (por exemplo, uma seqüência operacional) e desabilitados por alguma ação de controle. Em termos de implementação, tais eventos são gerados internamente (no programa do CLP), atualizando os supervisores correspondentes e sendo

restringidos por estes. De qualquer forma, os modelos das especificações continuam realizando o comportamento desejado similar àquele descrito para o sistema síncrono com todos os canais com atividade. No presente caso, as especificações são construídas de tal forma que limitam a ocorrência da sinalização de acordo com uma seqüência desejada de eventos.

Pode-se construir um modelo genérico para a configuração apresentada na figura 5.15, onde aqui se tem um número qualquer de canais intermediários sem atividade. Cada um desses canais será servido por um gerador de eventos  $P_i$ , de acordo com a proposta apresentada anteriormente. A configuração genérica utilizando a rede C/A é apresentada na figura 5.18. A especificação  $Ec1$  modela o fluxo de peças entre o primeiro canal com atividade ( $Cn0$ ) e o primeiro canal sem atividade ( $Cn1$ ) e a especificação  $Ec2$  modela o fluxo de peças entre o último canal sem atividade ( $CnN-1$ ) e o último com atividade ( $CnN$ ). As especificações  $Eci$  ( $i=0,\dots,N$ ) modelam o fluxo de peças entre os diversos canais sem atividade ( $Cn1$  a  $CnN-1$ ).

No caso do fluxo de peças de canal a canal ambos sem atividade, as especificações  $Eci$  evitam as seguintes situações:

- Sinalizar consecutivamente a mesma peça ou parte;
- Sinalizar a peça no canal  $i$  sem a mesma ter sido sinalizada no canal  $i - 1$ ;
- Acionar o sistema de transporte com peça sinalizada no canal  $i - 1$  e não sinalizada no canal  $i$ .

Pode-se em seguida generalizar o seguinte grupo de plantas locais, especificações genéricas, especificações locais e respectivas máximas linguagens controláveis correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.18. Estas informações são mostradas na tabela 5.3.

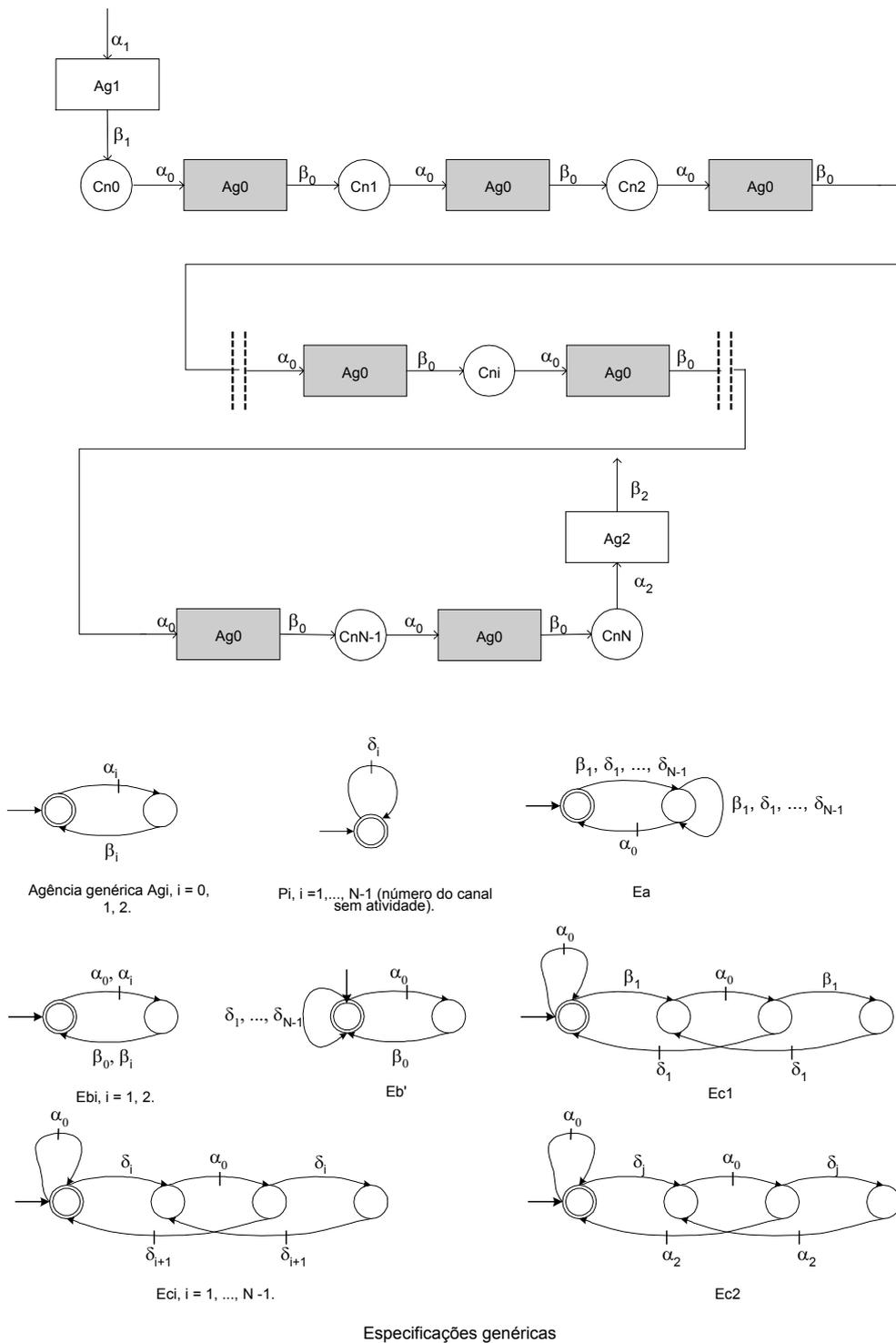


Figura 5.18 – Modelo genérico para a configuração sem atividades em  $n$  canais e especificações correspondentes.

Tabela 5.3 – Informações gerais sobre o PCS, a síntese e a modularidade correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.18.

Especificações genéricas	Plantas locais	Especificações locais	Máximas linguagens controláveis
Ea	$\hat{G}_{loc,a} = Ag0 \parallel Ag1 \parallel P1... \parallel Pi$	$E_{loc,a} = Ea \parallel Lm (G_{loc,a})$	$SupC(E_{loc,a}, \hat{G}_{loc,a})$
Ebi	$G_{loc,bi} = Ag0 \parallel Agi, i = 1, 2.$	$E_{loc,bi} = Ebi \parallel Lm (G_{loc,bi})$	$SupC(E_{loc,bi}, G_{loc,bi})$
Ebi'	$\hat{G}_{loc,bi'} = Ag0 \parallel Agi, i = 1, \dots, N.$	$E_{loc,bi'} = Ebi' \parallel Lm (\hat{G}_{loc,bi'})$	$SupC(E_{loc,bi'}, \hat{G}_{loc,bi'})$
Ec1	$G_{loc,c1} = Ag0 \parallel Ag1 \parallel P1$	$E_{loc,c1} = Ec1 \parallel Lm (G_{loc,c1})$	$SupC(E_{loc,c1}, G_{loc,c1})$
Eci	$G_{loc,ci} = Ag0 \parallel Pi \parallel Pi+1, i = 1, \dots, N-1.$	$E_{loc,ci} = Eci \parallel Lm (G_{loc,ci})$	$SupC(E_{loc,ci}, G_{loc,ci})$
Ec2	$G_{loc,c2} = Ag0 \parallel Ag2 \parallel PN-1$	$E_{loc,c2} = Ec2 \parallel Lm (G_{loc,c2})$	$SupC(E_{loc,c2}, G_{loc,c2})$
Verificar $\parallel SupC(E_{loc,j}, G_{loc,j}) = \parallel SupC(\hat{E}_{loc,j}, \hat{G}_{loc,j})$ , onde $j \in \{a, b1, b2, b1', \dots, bx', c1, ck1, \dots, ckx-1, c2\}$			

### 5.3.4 Especificações operacionais utilizando agências equivalentes na entrada e saída do sistema

Uma outra variante que se apresenta em SMMA é em relação à agência de fornecimento e retirada de peças, onde em alguns casos estas podem ser executados pelo mesmo dispositivo (contrariamente às configurações apresentadas até então). Observando o mecanismo mostrado na figura 3.3, nota-se que o manipulador pneumático linear tem duas funções: fornecer peças à mesa e retirar-las após serem processadas. Tornam-se necessárias algumas modificações nos modelos da planta e das especificações de operação: o modelo das agências de depósito e retirada das peças é representado agora por um autômato de três estados, representando dois modos de funcionamento da agência.

Existe a necessidade de outra especificação de exclusão mútua entre a entrada e saída de peças. Esse novo modelo é apresentado na figura 5.19, considerando um sistema de transporte assíncrono. Os eventos  $\alpha_{00}$  e  $\alpha_0$  representam o início de operação da mesma agência  $Ag0$ , sendo que cada um rotula o início de atividade sobre diferentes canais, o mesmo acontecendo com os eventos  $\beta_{00}$  e  $\beta_0$  que finalizam a atividade depositando as peças ou partes também em canais diferentes. Isso significa que o autômato que modela este comportamento deverá possuir três estados, sendo um inicial, o segundo representando a agência operando a partir da ocorrência de  $\alpha_0$  e o terceiro operando a partir da ocorrência de  $\alpha_{00}$ .

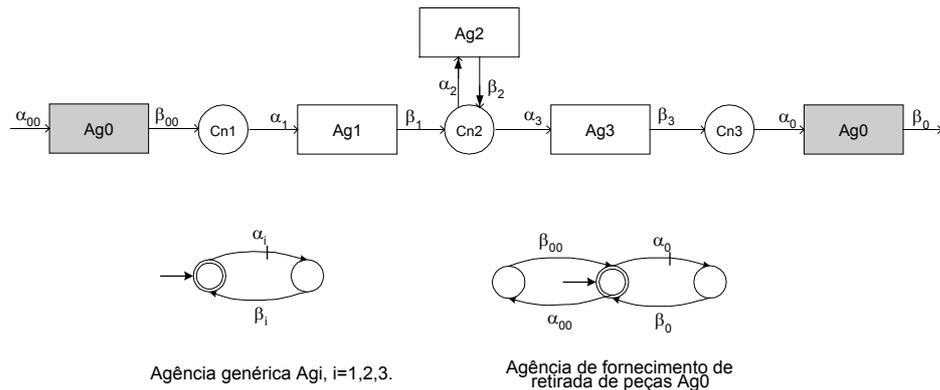


Figura 5.19 – Representação de um SMMA com mesmo mecanismo de fornecimento e retirada de peças, com sistema de transporte assíncrono.

As especificações para o SMMA ilustrado na figura 5.19 são apresentadas na figura 5.20. Observa-se que as especificações mantêm a mesma estrutura dos casos anteriores e a mudança é observada na modelagem da agência que realiza o fornecimento e retirada de peças (agência  $Ag_0$ ). As especificações  $E1$ ,  $E2$  e  $E3$  controlam a correta seqüência de eventos no canal 2 ( $Cn2$ ), enquanto as especificações  $E4$  e  $E5$  controlam a não ocorrência de *overflow* e *underflow* do canal 1 e 3 ( $Cn1$  e  $Cn3$ ), respectivamente.

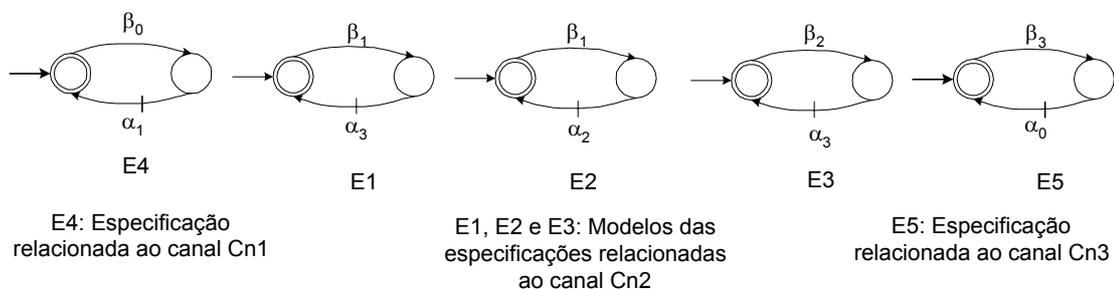


Figura 5.20 – Especificações para o SMMA ilustrado na figura 5.19.

De forma análoga aos casos anteriores, aplica-se a metodologia proposta por QUEIROZ e CURY (2000a) (2000b) para a síntese de supervisores localmente modulares, verificando-se que as máximas linguagens controláveis são localmente modulares para a configuração apresentada na figura 5.19.

Pode-se utilizar também uma configuração onde as agências de fornecimento e retirada da peça são executadas pelo mesmo mecanismo onde a diferença está na utilização de um transportador síncrono. Dessa forma, algumas modificações na planta e nas especificações genéricas são

necessárias. A configuração desse sistema utilizando a rede C/A é apresentada na figura 5.21, enquanto as especificações para este sistema são apresentadas na figura 5.22.

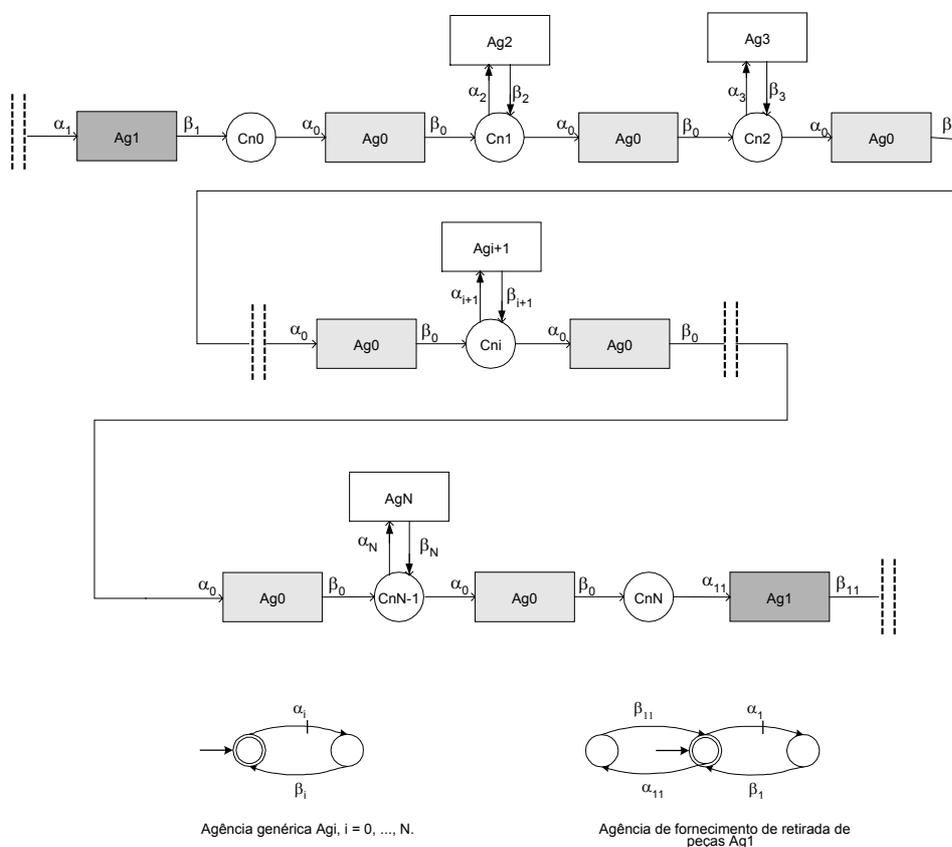


Figura 5.21 – Representação de um SMMA com mesmo mecanismo de fornecimento e retirada de peças, com sistema de transporte síncrono.

De acordo com a figura 5.22, observa-se que existe uma especificação adicional  $EcN$  que modela o fluxo de peças no final da linha (entre o canal  $CnN-1$  e o canal  $CnN$ ). Esta especificação é acrescentada ao grupo de especificações em virtude da estrutura da agência  $Ag1$ , onde nesta existe a ocorrência dos eventos  $\alpha_1$  (fornecimento de peças) e  $\alpha_{11}$  (retirada de peças), sendo este último evento impedido de ser rotulado pelo indexador  $i$  das especificações  $Eci$  (figura 5.22).

Da mesma forma que os casos anteriores, pode-se generalizar o seguinte grupo de plantas locais, especificações genéricas, especificações locais e respectivas máximas linguagens controláveis correspondentes ao SMMA apresentado na figura 5.21. Estas informações são mostradas na tabela 5.4.



A composição destes subsistemas pode ser caracterizada por bifurcações ou junções e ao mesmo tempo o problema de controle supervísório poderá já estar estabelecido e resolvido (síntese dos controladores e verificação da modularidade) individualmente. Nesses casos, uma especificação adicional relacionada ao controle do fluxo de matéria no canal de junção de tais subsistemas deve ser elaborada. Ainda, como tais subsistemas irão compartilhar eventos, a proposta do controle modular local estabelece que todas as máximas linguagens controláveis resultantes devem ter a propriedade de modularidade verificada. Em outras palavras, a verificação parcial da modularidade não garante o não conflito para todas as combinações possíveis de subconjuntos de controladores.

Nesta seção são analisados dois tipos de uniões e/ou ramificações de subsistemas: o primeiro diz respeito àquelas ocorridas num canal, ou seja, este será o elemento de interligação dos subsistemas; o segundo diz respeito às uniões ou ramificações em uma agência, sendo esta o elemento de interligação dos subsistemas.

A figura 5.23 abaixo ilustra o primeiro caso, mostrando os tipos de junções possíveis (com no máximo duas entradas e/ou saídas no canal) entre subsistemas que por sua vez poderiam ter as máximas linguagens controláveis estabelecidas previamente. Estes subsistemas podem ter as mais diversas configurações, ou seja, podem ter qualquer combinação entre as possíveis de agências síncronas e assíncronas. A figura 5.23 mostra os casos onde as junções são realizadas através do canal, sendo este onde se deve incluir uma nova especificação para o controle de fluxo de matéria (não overflow e underflow).

Observa-se ainda a partir da figura 5.23 que existem diferentes especificações relacionadas ao canal de junção, dependendo do modo de operação desejado pelo projetista. Por exemplo, na estrutura da figura 5.23a pode-se ter a especificação básica de não ocorrência de overflow e underflow no canal ou esta mesma especificação com a condição adicional de alternância dos eventos de saída ( $\alpha_2$  e  $\alpha_3$ ).

Pode-se também prever que no canal onde ocorre a junção de subsistemas ocorrerá uma determinada atividade, conforme mostra a figura 5.24. Nesse caso, tem-se o grupo de especificações similar àquele mostrado na figura 5.9, adicionando o comportamento relacionado à união dos subsistemas. De forma similar ao caso anterior, mostrado na figura 5.23, o projetista poderá selecionar diferentes especificações sobre o canal de junção, de acordo com o comportamento desejado para este.

Os casos mostrados nas figuras 5.23 e 5.24 tratam de junções de subsistemas que ocorrem em canais, em que é necessária a inclusão de uma nova especificação operacional. Entretanto, uma junção poderá ocorrer numa agência, podendo esta servir como um elemento de convergência ou de divergência entre subsistemas. O projetista então poderá fazer duas interpretações: a primeira, onde ele especifica diretamente o comportamento desejado da agência; a segunda, onde o projetista observa que aquela agência está num nível de abstração diferente das demais na estrutura

funcional, sendo necessário então um refinamento exclusivo da referida agência de forma a alcançar um nível de abstração semelhante ao da estrutura funcional original. O segundo caso é ilustrado na figura 5.25.

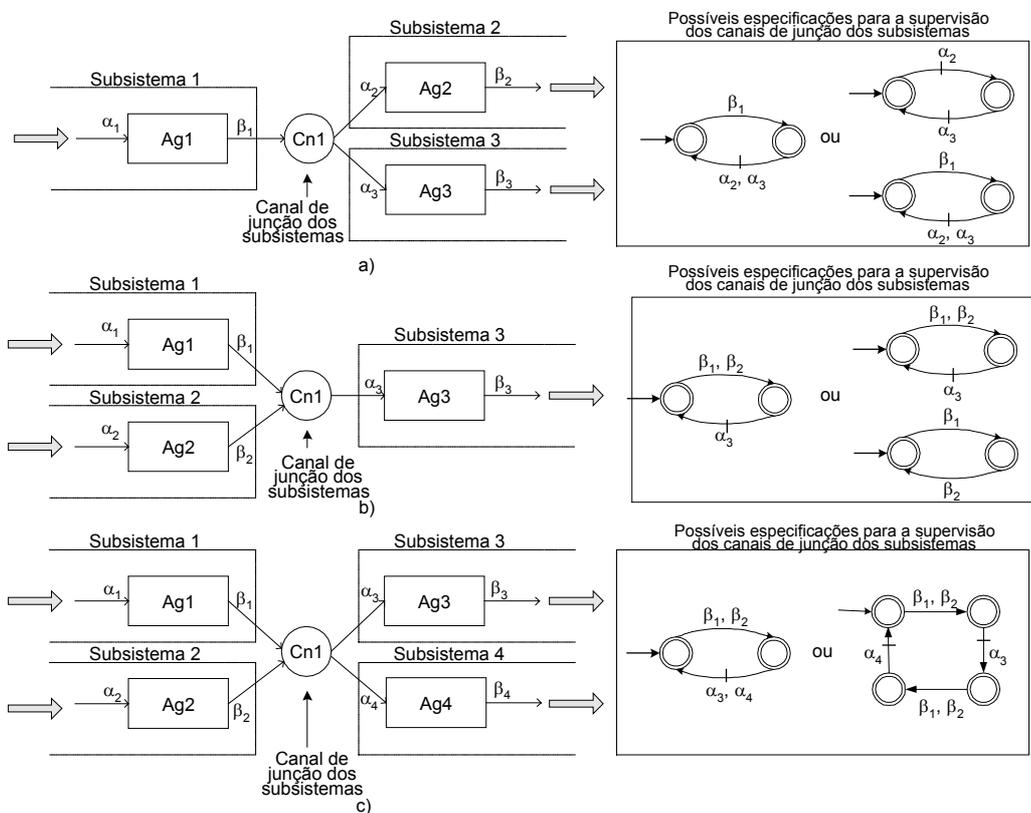


Figura 5.23 – Configurações estruturais relacionadas à junção de subsistemas.

Observa-se a partir da figura 5.25 que o refinamento de determinadas agências conduz naturalmente à utilização de modelos em autômatos de dois estados, como discutido na seção 5.2. Dessa forma, a recomendação geral na atividade de decomposição funcional é buscar sempre um nível de refinamento onde se possa ao mesmo tempo utilizar modelos comportamentais simples (por exemplo, o autômato de dois estados) e estabelecer um nível de abstração adequado.

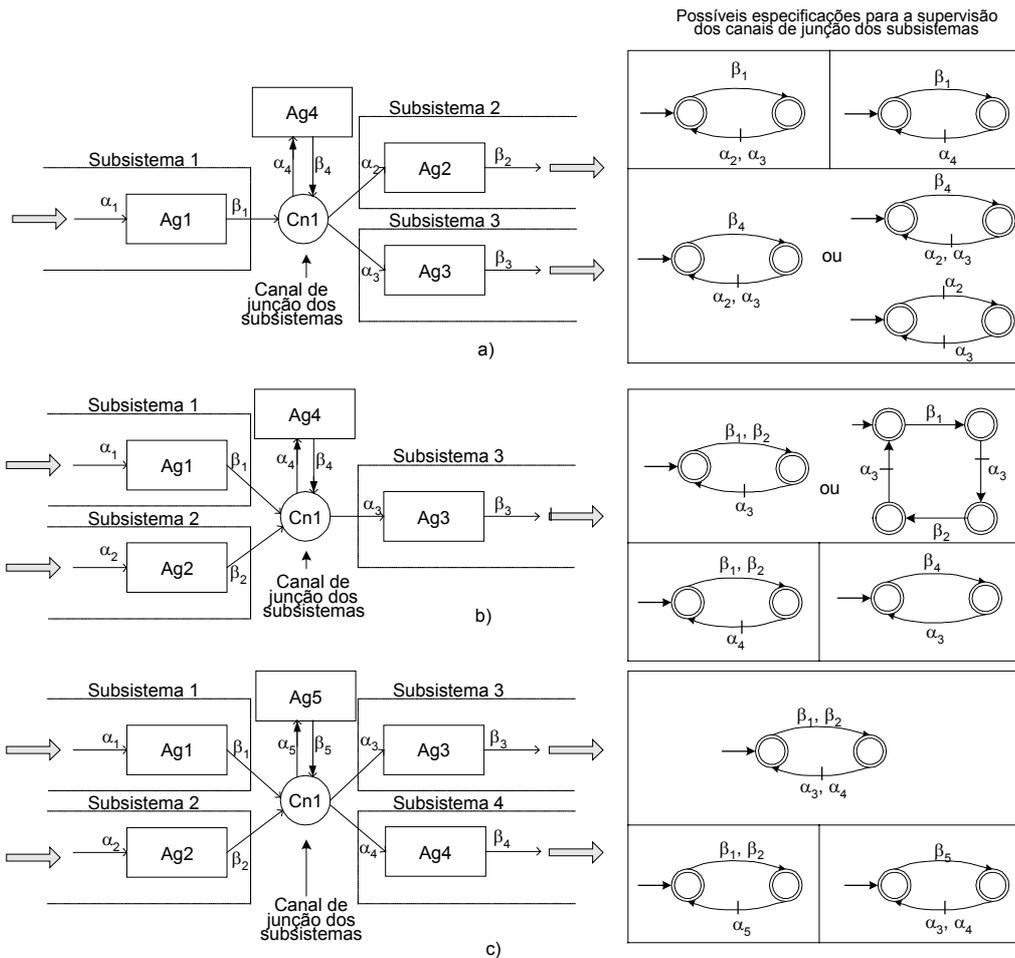


Figura 5.24 – Configurações relacionadas à junção de subsistemas, com atividade no canal de união.

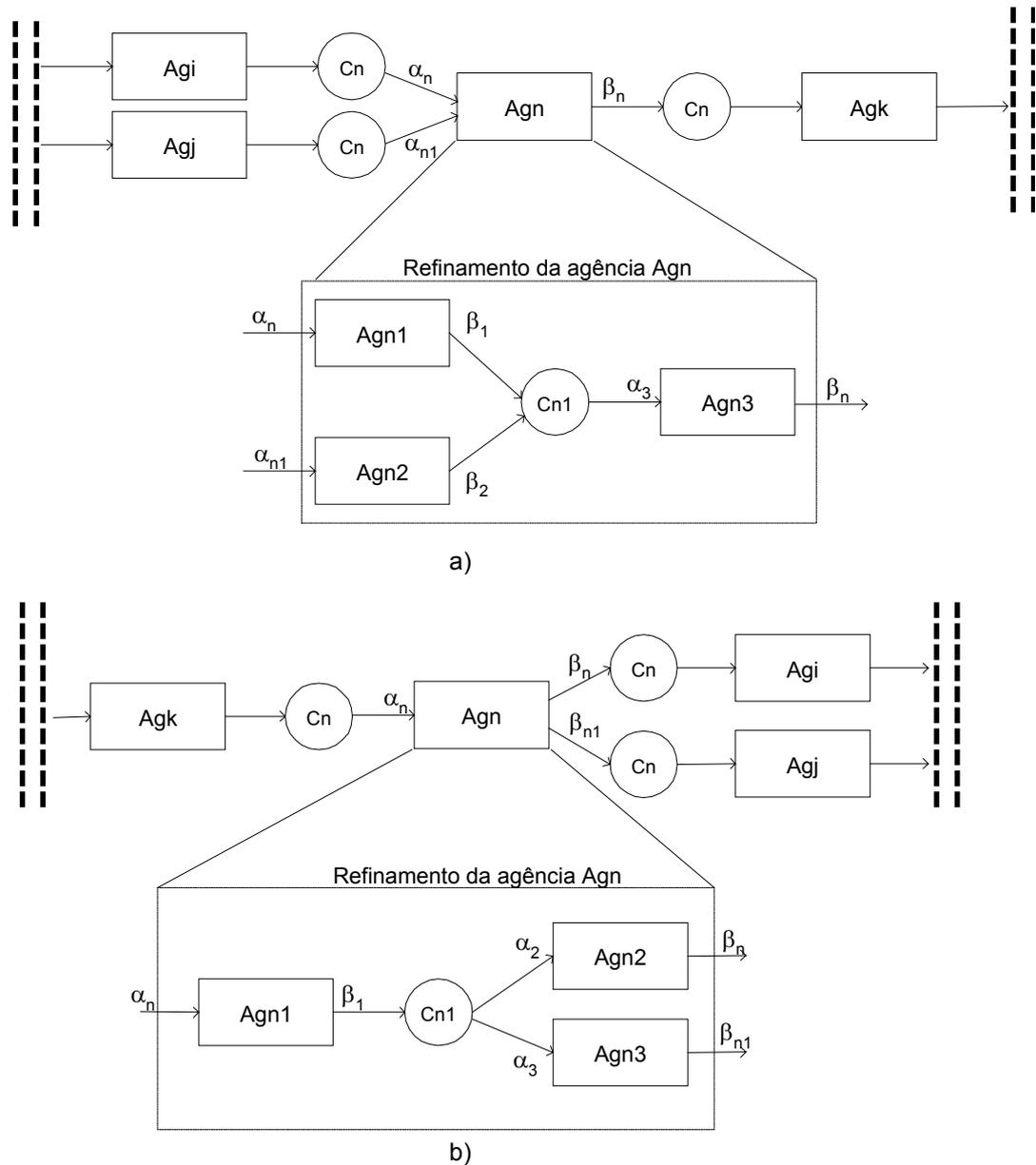


Figura 5.25 – Junção e ramificação de subsistemas numa agência.

Quando o projetista determina o comportamento desejado da agência, um refinamento posterior não é necessário. Por outro lado, a identificação de novos canais e agências através do refinamento da agência original traz outro problema de controle, em vista do surgimento de controladores para os novos canais que estarão em diferentes níveis em relação à estrutura global do sistema de controle. Considerando o caso mostrado na figura 5.25a, o projetista poderá determinar o comportamento da agência  $n$  das duas formas descritas e agora ilustradas nas figura 5.26 e 5.27. O primeiro caso, figura 5.26, o projetista estabelece que a agência deverá retirar a peça dos canais

conforme a chegada de matéria nestes. Assim, o refinamento da agência não é necessário, sendo o comportamento desta completamente determinado pelo autômato da figura 5.26.

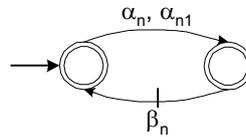


Figura 5.26 – Modelo da agência Agn mostrada na figura 5.25a.

Quando o projetista identifica que a agência necessita ser refinada, novos canais surgem e trazem consigo a necessidade de controle do fluxo de matéria. Considerando o refinamento da agência Agn mostrado na figura 5.25a, o surgimento do canal Cn1 demanda a necessidade de uma nova especificação, conforme mostra a figura 5.27a. A máxima linguagem controlável relativa a esta especificação é mostrada na figura 5.27b. A questão remanescente é qual modelo da agência deverá ser utilizado no nível estrutural original, aquele que não sofreu refinamento como a agência Agn. Como esta agência deve ter um comportamento controlado determinado pelo supervisor mostrado na figura 5.27b, o modelo no nível original deverá seguir este comportamento. Desta forma, o modelo da agência Agn (figura 5.25a) será o autômato agregado (TORRICO e CURY, 2002) correlacionado ao modelo mostrado na figura 5.27b, sendo os eventos relevantes considerados aqueles relacionados à entrada e saída da agência na estrutura funcional original (sem refinamento). Esta agregação e o modelo resultante são mostrados na figura 5.28.

Dessa forma, o modelo da agência utilizado na estrutura funcional original será aquele apresentado na figura 5.28b. Este modelo pressupõe um comportamento de baixo nível controlado segundo as especificações já tratadas (correto fluxo de peças).

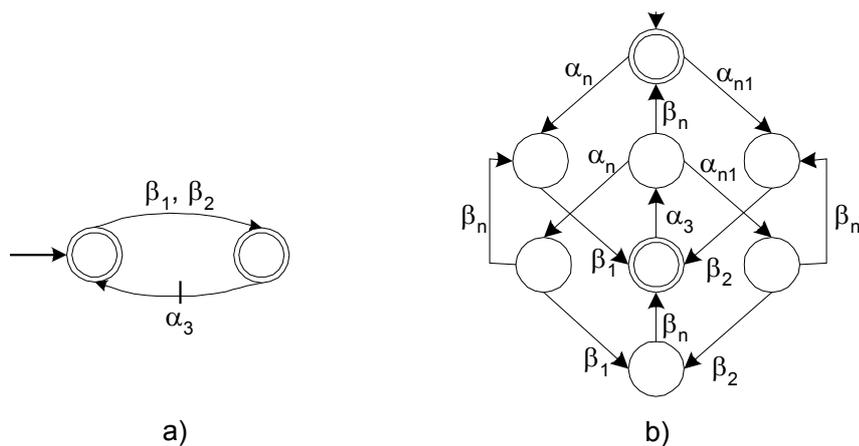


Figura 5.27 – (a) Especificação do canal Cn1 (figura 5.25a); (b) Máxima linguagem controlável correspondente.

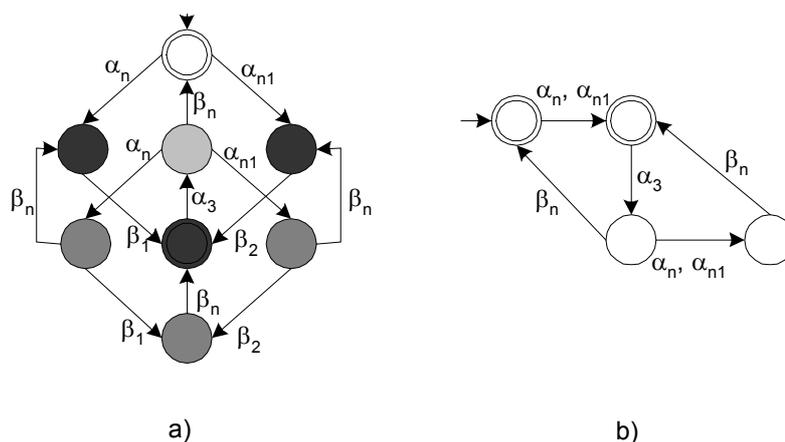


Figura 5.28 – (a) Partições selecionadas; (b) Modelo resultante da agregação dos estados.

Outra possibilidade de modelagem da agência Agn (figura 5.25a) é estabelecer outra especificação para o canal refinado, obtendo-se um modelo agregado diferente daquele mostrado na figura 5.28b. Na verdade, um outro modelo a ser selecionado é uma contingência imposta pelo funcionamento pretendido, mais que uma opção de modelagem. Um exemplo é mostrado na figura 5.29. A nova especificação (figura 5.29a) ilustra a alternância entre os eventos de entrada no canal ( $\beta_1$  e  $\beta_2$ ).

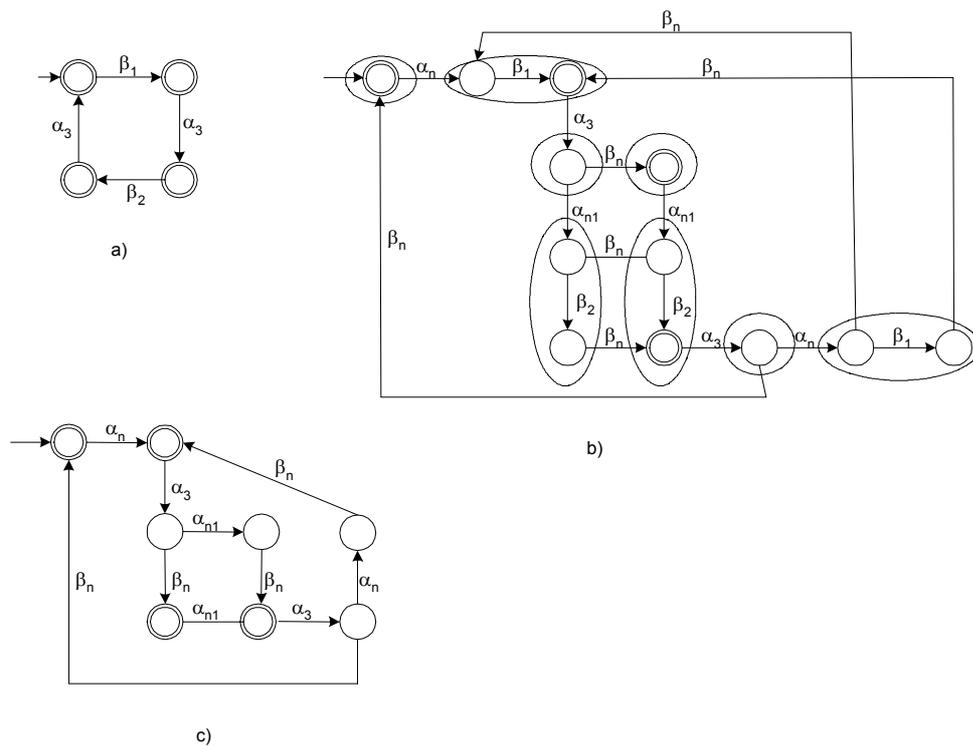


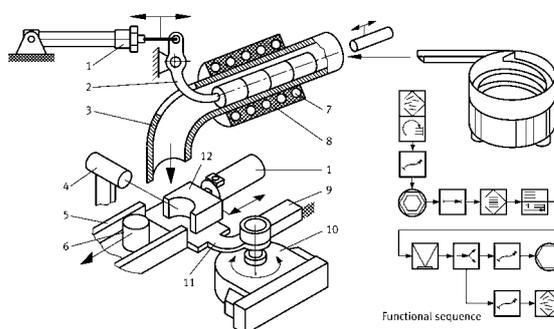
Figura 5.29 – (a) Especificação genérica; (b) Máxima linguagem controlável correspondente e as partições obtidas; (c) Modelo agregado.

### 5.5 Especificações relacionadas aos Sistemas de Medição (SMs)

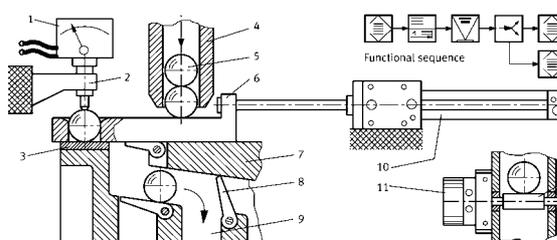
As agências relacionadas aos SMs estão associadas a sensores ou transdutores que extraem informações do meio físico (no caso, peças ou partes). Em SMMAs tais informações são caracterizadas por atributos das peças ou partes – cor, orientação, dimensão, dentre outros – que serão geralmente utilizadas por outras agências no sistema para a tomada de decisões. Estas podem ser caracterizadas geralmente por seleção de atividades (um atributo define qual atividade será realizada), seleção de rotas ou armazéns, classificação, dentre outras.

A figura 5.30 apresenta dois exemplos de extração de informações. O primeiro, figura 5.30a, representa um mecanismo que tem o objetivo de alimentar peças em alta temperatura para uma máquina ferramenta. Como uma temperatura mínima deve ser garantida durante esta operação, um sensor (4) extrai da peça o valor da temperatura e, caso se alcance um valor abaixo do permitido, o atuador rotativo (9 e 10) é acionado e a peça é expulsa. Caso contrário, o atuador linear (1) posiciona a peça no transportador (5) para ser processada. No segundo exemplo, figura 5.30b, componentes são selecionados com base nas suas dimensões, de forma que as peças sejam classificadas em grupos de tolerância. O alimentador (6) posiciona as peças na unidade de medição

(1 e 2) e em seguida o alimentador recua permitindo a passagem das peças no módulo de classificação (7). Aqui, dependendo da dimensão extraída, dois caminhos podem ser selecionados.



a)



b)

Figura 5.30 – Exemplos de SMMAs com sistemas de medição (FESTO, 2000a).

A modelagem das informações extraídas das peças e partes (que por sua vez irão gerar especificações operacionais) aponta para a possibilidade de flexibilização do SMMA. Em vez de se trabalhar com o conceito de produção em lote (apenas um produto na linha), pode-se permitir que o sistema seja dotado de poder de identificação de diferentes peças ou partes (através da extração de informações) de forma a executar diferentes processos simultaneamente. Assim, através da obtenção de uma informação específica, pode-se selecionar a atividade correspondente em uma estação de trabalho específica. Por exemplo, através da identificação da dimensão da peça, diferentes programas em uma máquina CNC podem ser selecionados. Esta descrição está de acordo com a definição de *Sistema Flexível de Manufatura*, que pode ser entendido como um sistema capaz de identificar o tipo de peça ou parte que circula ao longo dos seus diversos mecanismos (GROOVER, 2001).

A idéia central da modelagem do fluxo de informações num SMMA é que toda peça ou parte, depois de extraído o atributo ou propriedade correspondente, carregará consigo esta informação ao

longo do sistema. Tem-se então uma fila de informações do tipo FIFO (*first-in-first-out*), onde a entrada é localizada no canal onde ocorre a extração da informação e a saída é localizada no canal onde a informação será utilizada.

A questão que se coloca aqui é como modelar este comportamento utilizando os modelos anteriormente apresentados, sejam estes modelos de plantas ou especificações. Conclui-se que para inserir os atributos de peças ou partes adquiridos num sistema de medição é necessário modificar a estrutura dos autômatos que representam as plantas e especificações operacionais. Fazendo uma analogia com a teoria de redes de Petri Coloridas (JENSEN, 1991), deve-se “colorir” o modelo de forma a manter a estrutura funcional original (a rede C/A) e inserir nos autômatos a informação relacionada aos atributos.

A figura 5.31 ilustra uma estrutura funcional de um SMMA onde um sistema de medição adquire três possíveis informações ( $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ) relacionadas a algum atributo da peça/parte. Observa-se que os modelos das agências (figura 5.31b) incluem a informação através da indexação dos eventos ( $\alpha_{ij}$  e  $\beta_{ij}$ ,  $i$ =número da agência,  $j$ =número ou rótulo da informação). As especificações operacionais (figura 5.31c), nesse caso não ocorrência de overflow e underflow dos canais, estabelecem que o correto fluxo de matéria é dependente também das informações e não só da presença ou ausência destas nos canais correspondentes. Por exemplo, chegando uma peça num canal Cn2 com informação  $\delta_3$  ( $\beta_{23}$ ), o evento de retirada da peça habilitado será o rotulado com a mesma informação – o evento  $\alpha_{33}$ .

Pode-se observar claramente que a inclusão de informações nos modelos básicos apresentados anteriormente (tanto para as agências como para as especificações) acarreta num aumento da complexidade tanto do processo de síntese e da verificação da modularidade como da operacionalização da estrutura de controle global. Observa-se também que este fato tende a tornar-se ainda mais complexo quanto mais o sistema de medição estiver afastado da agência onde as informações obtidas serão utilizadas (na figura 5.31, a agência  $k$ ). Nesse caso, tem-se mais agências e maior número de especificações rotuladas acarretando dessa forma maior esforço computacional na síntese e operação (incremento da memória necessária do CLP), além da maior dificuldade na legibilidade e entendimento do programa de controle.

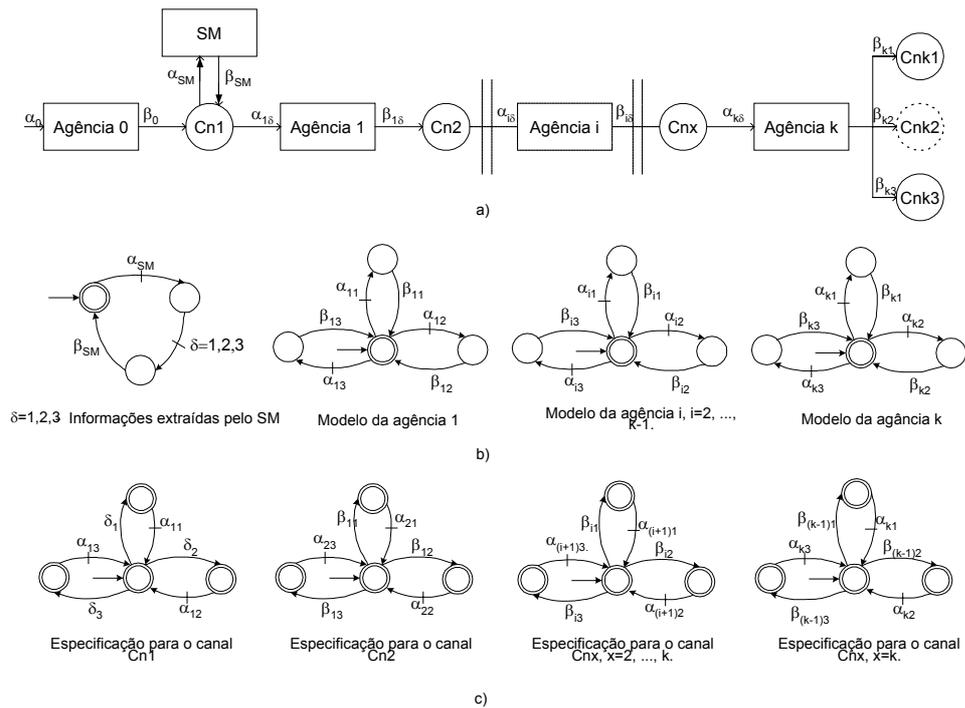


Figura 5.31 – Descrição funcional de um SMMA com sistema de medição: (a) Rede C/A correspondente; (b) Modelos das agências; (c) Especificações para os canais.

Assim posto, o presente trabalho propõe que as especificações relacionadas aos sistemas de medição (ou ao fluxo de informações no SMMA) não sejam tratadas ou incluídas na estrutura de controle, em vista das desvantagens citadas. Tais especificações deverão ser tratadas numa outra estrutura de controle, por exemplo, através da elaboração de filas ou pilhas no CLP. Nesse caso, quando a matéria chegar na agência onde uma decisão será tomada em função de uma informação adquirida, o programa sinalizará qual decisão deverá ser realizada por esta agência.

Ainda sobre o problema tratado, recomenda-se na fase de projeto estabelecer a maior proximidade possível do sistema de medição da agência onde decisões serão tomadas. Seguindo esta orientação, o projetista garante um melhor desempenho do sistema de controle, em função da diminuição do tamanho da fila ou pilha no programa do CLP.

## 5.6 Especificações relacionadas ao controle do número de peças ou partes presentes num SMMA

Na fase do projeto informacional de um SMMA, pode-se ter como requisito fundamental que o sistema a ser projetado possa se adaptar a situações de demanda de produção. Por exemplo, pode-se prever que o sistema possa se adaptar facilmente (sob o ponto de vista de supervisão e controle) a uma especificação que restrinja o número de peças ou partes sendo processadas ou montadas. Para

alcançar este objetivo de projeto, o aspecto essencial a ser considerado é qual a abordagem mais adequada a ser utilizada.

Uma primeira hipótese seria incluir esta especificação na estrutura de controle estudada nas seções 5.3 e 5.4, de forma a tentar simplificar o problema. Ao contrário, esta classe de especificações, do mesmo modo que o caso estudado na seção 5.5, aumentaria a complexidade de síntese e de operação dos controladores.

Da mesma forma que o controle modular local, algumas outras abordagens tratam o problema de complexidade computacional para sistemas de maior porte. É o caso das abordagens baseadas em aspectos de simetria proposta por EYZELL e CURY (2001) e na criação de arquiteturas adequadas, como o controle hierárquico (ZHONG e WONHAM, 1990) (TORRICO e CURY, 2002) (da CUNHA e CURY, 2002) (da CUNHA et al., 2002), o controle modular (WONHAM e RAMADGE, 1988), o controle descentralizado (RUDIE e WONHAM, 1992) e o controle modular local (QUEIROZ e CURY, 2000a).

No caso tratado nesta seção, observa-se que a especificação requerida pressupõe que os eventos relevantes a serem observados e considerados são aqueles relacionados à entrada e saída do SMMA projetado. Em outras palavras, os eventos internos ao sistema (todos os eventos  $\alpha$  e  $\beta$  das agências que não sejam extremidades do sistema) não são relevantes para se restringir o número de peças ou partes na linha de produção. Este aspecto leva a considerar uma divisão da ação de controle em dois níveis de hierarquia, um alto nível preocupado unicamente com o comportamento dos eventos relevantes (de forma a controlar o número de peças ou partes) e um baixo nível encarregado da implementação sequencial das subtarefas (aquelas relacionadas ao correto fluxo de peças ou partes, descritas nas seções 5.3 e 5.4).

Nesse sentido, utiliza-se a abordagem de controle hierárquico por agregação de estados proposta por TORRICO e CURY (2002). Nessa abordagem, considera-se um baixo nível que representa o comportamento real do sistema e um alto nível (nível  $\pi$ ) obtido pela agregação de estados do baixo nível. A agregação é feita de tal modo que os estados agregados dentro de um mesmo bloco estejam ligados por eventos não relevantes e tenham um significado ou algum sentido em comum.

No caso tratado, considera-se que os eventos relevantes são os de entrada na primeira agência do SMMA ( $\alpha_1$ ) e de entrada e saída da última agência do SMMA ( $\alpha_k$  e  $\beta_k$ , sendo a agência  $k$  a última agência). A figura 5.32a mostra uma estrutura composta de duas agências assíncronas (Ag1 e Ag3) com uma atividade no canal Cn2, com as especificações já descritas que realizam o correto fluxo de matéria neste canal. A figura 5.32b mostra a máxima linguagem controlável e as partições do conjunto de estados, considerando como eventos relevantes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  e  $\beta_3$ . A figura 5.32c mostra o autômato agregado  $\pi$ , sendo este o modelo a ter uma nova especificação operacional de alto nível inserida (controle do número de peças ou partes no sistema). Pode-se observar claramente na figura 5.32 que uma restrição operacional poderia ser a de que somente uma peça circule no sistema por

vez. Esta especificação é conseguida através da proibição de entrada no estado onde dois eventos  $\alpha_1$  ocorrem (figura 5.32c), bastando para tal a desabilitação do segundo evento  $\alpha_1$ .

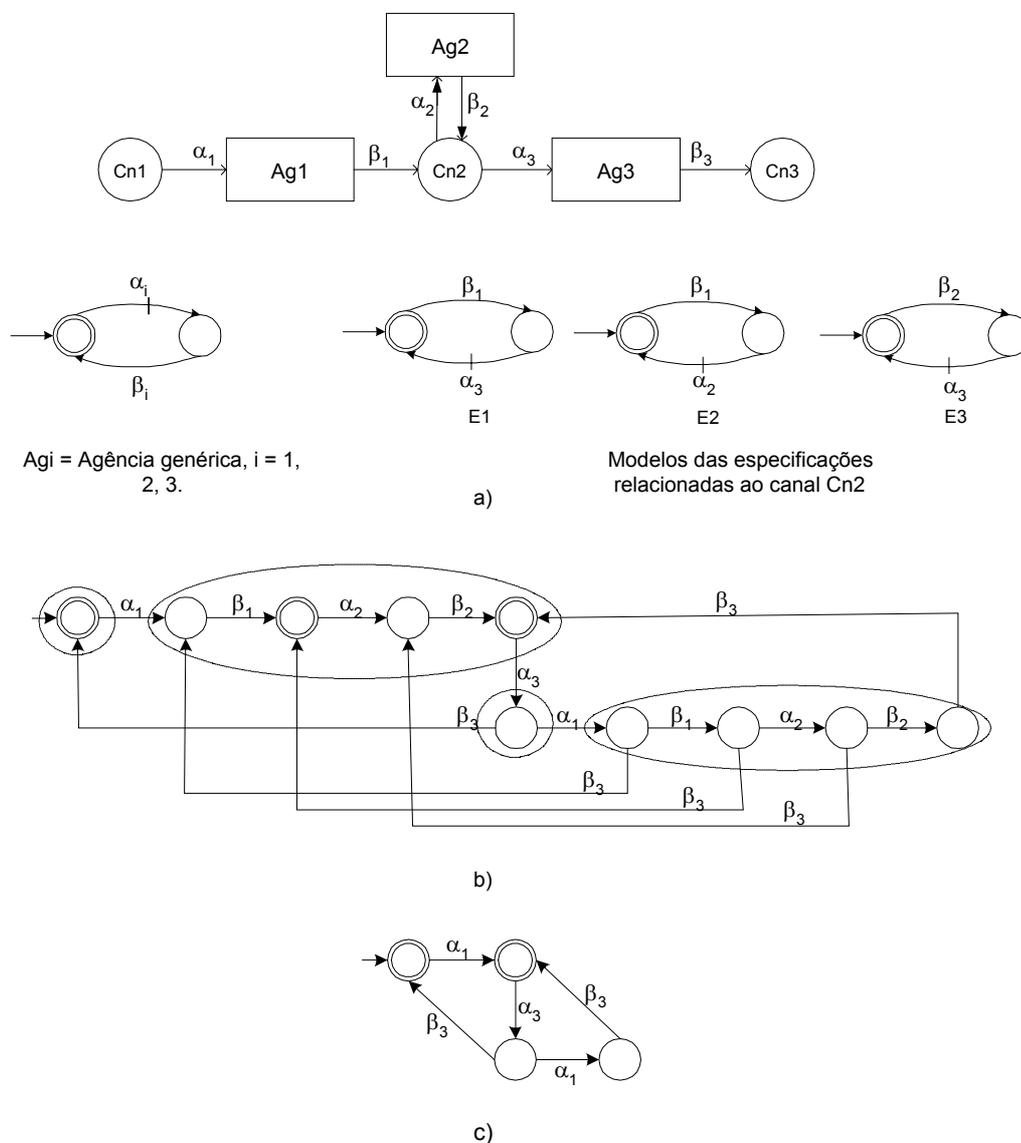


Figura 5.32 – (a) Estrutura funcional com especificações genéricas correspondentes; (b) Máxima linguagem controlável e agregação de estados; (c) Autômato agregado  $\pi$ .

Pode-se mostrar facilmente que a inclusão de novas agências de manipulação ou transporte e de processamento ou montagem (aumento do SMMA) mantém uma estrutura agregada similar aquela mostrada na figura 5.32c. Apesar do crescimento exponencial do número de estados em função da composição dos subsistemas, o modelo agregado tem crescimento de estados de forma polinomial. As figuras 5.33 e 5.34 ilustram o caso onde existem dois e três canais com atividades. Em virtude do tamanho não são mostrados os autômatos correspondentes às máximas linguagens controláveis,

mas apenas o modelo agregado considerando os eventos de entrada e saída. Nota-se claramente a similaridade de estrutura (figuras 5.33b e 5.34b) e o crescimento polinomial do número de estados. Pode-se mostrar facilmente que este comportamento se mantém para um número de canais considerado razoável para aplicações práticas. Também, a similaridade de estrutura se mantém mesmo quando alguns (ou todos) canais não têm atividades sendo executadas.

A partir das figuras 5.33 e 5.34, nota-se que cada estado marcado do modelo corresponde a uma peça ou parte no sistema projetado. Dessa forma, as especificações aqui tratadas são expressadas em termos de estados proibidos, que por sua vez é dependente do número de peças que se quer circulando na linha.

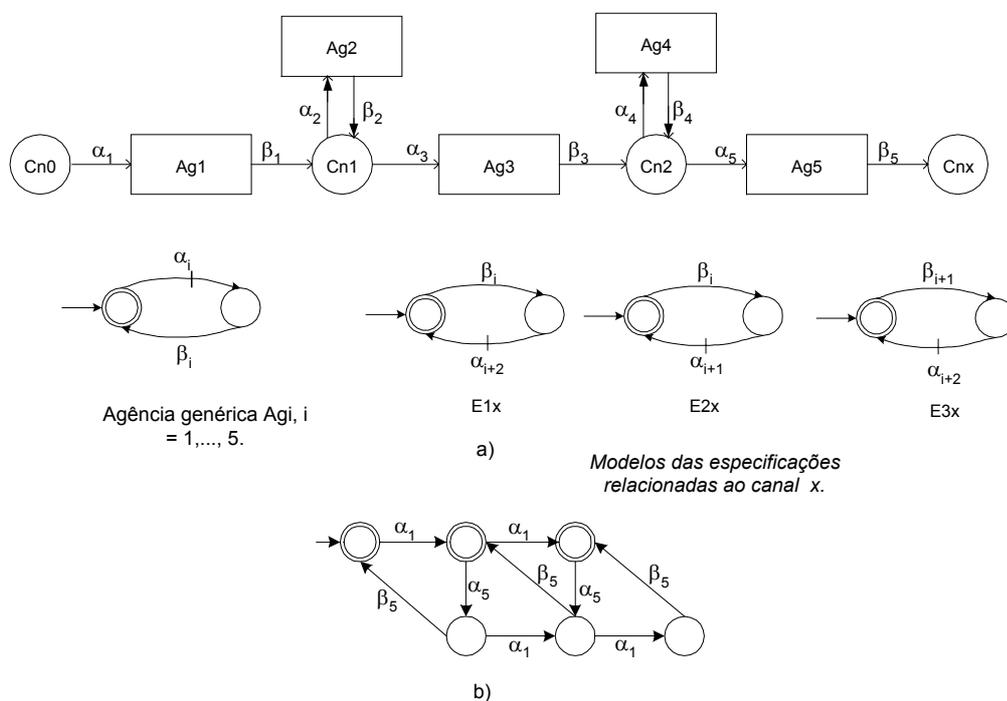


Figura 5.33 – (a) Estrutura funcional com especificações genéricas correspondentes; (b) Autômato agregado  $\pi$ .

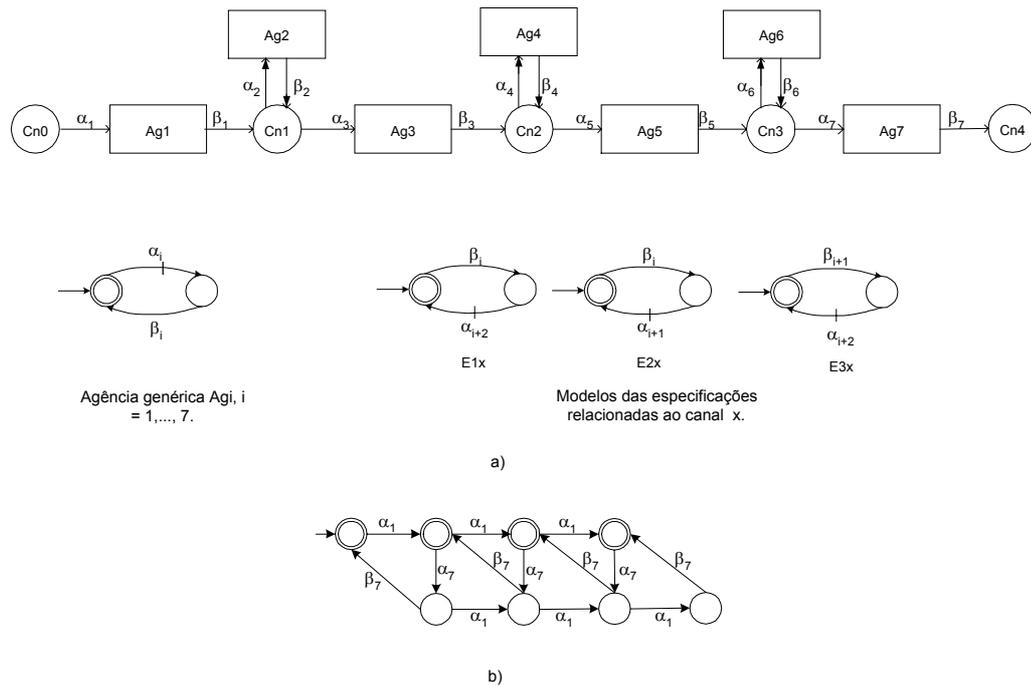


Figura 5.34 – (a) Estrutura funcional com especificações genéricas correspondentes;  
(b) Autômato agregado  $\pi$ .

Pelas características observadas nos sistemas estudados no presente trabalho ou das especificações impostas a estes, nenhum dos problemas apontados por TORRICO e CURY (2002) aparece no processo de agregação de estados, considerando os eventos de entrada e saída do sistema projetado como relevantes. O incremento do número de agências e especificações, além de manter a similaridade da estrutura agregada e o crescimento polinomial do número de estados agregados, não acarreta situações de não determinismo e não cumprimento das condições para se estabelecer a consistência hierárquica forte (TORRICO e CURY, 2002).

## 5.7 Conclusão

O arcabouço de especificações apresentado neste capítulo permite uma maior sistematização da atividade de descrição funcional de SMMA, principalmente devido à complexidade envolvida na sua modelagem. Através desta base de conhecimento o projetista descreve os efeitos requeridos pelas agências, de forma que o comportamento destas realize a função desejada para o sistema em projeto.

Apesar destes modelos não serem exaustivos, no sentido de alcançarem todas as possibilidades de configurações, a construção dos modelos de especificações apresentada sistematiza esta

atividade ao projetista. Dessa forma, mesmo se deparando com uma configuração não apresentada neste capítulo, é possível construir as especificações tendo como base a sistemática mostrada.

O capítulo também explora a modelagem das agências, uma vez que a obtenção de tais modelos caracteriza uma complexidade adicional no desenvolvimento do projeto. De maneira geral, é recomendável a utilização de modelos simples e que ao mesmo tempo representem de forma adequada o comportamento das agências. Nesse sentido, o modelo em autômato de dois estados foi adotado como modelo principal a ser seguido na descrição funcional do sistema em projeto.

Outro ponto relevante explorado é quando as agências possuem junções e/ou ramificações, ou seja, mais de uma entrada e/ou saída (múltiplos canais). Recomenda-se que tais agências sejam refinadas até o ponto onde só existam na estrutura funcional agências com uma entrada e saída, sendo portanto possível a utilização do modelo em autômato de dois estados. Entretanto, podem existir situações onde é relativamente simples obter um modelo em autômato, diferente daquele de dois estados com eventos  $\alpha$  e  $\beta$ , correspondente a uma determinada agência, que modele de forma adequada o comportamento desta.

O refinamento é uma alternativa adequada, embora acarrete uma maior dificuldade na modelagem e traga a seguinte dúvida ao projetista: qual opção deve ser seguida, o refinamento da agência e a identificação de um modelo agregado (ver figuras 5.28 e 5.29) ou a elaboração de um novo modelo em autômato que parece ser adequado ao comportamento desta agência? Esta pergunta sugere que uma nova base de conhecimento deve ser construída, englobando modelos agregados correspondentes a agências com junções e ramificações. O projetista então poderá consultar diversos modelos e optar pelo mais adequado. Pela dimensão e profundidade do problema, este assunto fica registrado aqui como perspectiva de trabalhos futuros.

O presente capítulo mostra a recomendação de que algumas especificações sejam tratadas de outra forma, não no nível operacional em que está o grupo de especificações relacionado ao correto fluxo de peças. É o caso do fluxo de informações que surge a partir dos sistemas de medição, onde este fluxo pode ser tratado aplicando recursos do próprio controlador lógico programável, como a elaboração de pilhas. Também, a restrição do número de peças num sistema pode ser tratada utilizando a abordagem de controle hierárquico por agregação de estados, em virtude das características das especificações relacionadas.

Neste último caso, propõe-se uma direção de solução ao projetista, caso os requisitos de projeto confrontados com aspectos econômicos levem a uma decisão em que o controle do número de peças e/ou partes fluindo no sistema seja fundamental. Obviamente pode-se também sugerir que este tipo de especificação seja tratado de outra forma, também utilizando técnicas de programação de CLPs (contagem, filas, dentre outras). De qualquer forma, as características analisadas na agregação de estados, como a similaridade de estrutura e o não aparecimento de não determinismo,

e por outro lado as especificações serem em termos de estados proibidos, leva a apontar o controle hierárquico como uma alternativa promissora para este caso.

Confrontando este aspecto, em função da arquitetura proposta (diversas plantas com processos concomitantes), o presente trabalho reafirma a utilização do controle modular local, em virtude das vantagens já amplamente discutidas.

## 6. PROJETO CONCEITUAL DE SMMA: UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado um exemplo de projeto de um SMMA onde é aplicada a metodologia proposta nos capítulos 4 e 5, utilizando os conhecimentos apresentados nos demais capítulos. Será tratado o projeto conceitual de um SMMA, onde a sistematização do processo de projeto juntamente com as abordagens utilizadas, temas discutidos nos capítulos anteriores, são aplicadas de forma a garantir a simultaneidade de atividades concernentes ao projeto físico e de controle.

O processo de projeto do SMMA em questão é detalhado em cada uma das suas atividades, onde as principais questões relacionadas à descrição funcional, o estabelecimento da estrutura de controle e a integração das concepções física e de controle são levantadas de forma a disponibilizar um melhor entendimento da metodologia e das ferramentas discutidas ao longo do presente trabalho.

Visando uma melhor organização do presente capítulo, cada uma das seções corresponde às diversas atividades do projeto conceitual proposto no capítulo 4 e ilustrado na figura 4.1. As atividades relacionadas ao projeto do sistema de controle e que são realizadas concomitantemente às atividades de concepção física, são apresentadas na mesma seção de forma a ilustrar adequadamente o processo de projeto proposto.

### 6.1 Especificação de projeto

O sistema a ser projetado tem por objetivo principal classificar as peças de acordo com o tipo, furar, montar pequenas partes nestas peças, embalar e armazenar as peças montadas de acordo com requisitos do usuário. As peças brutas são de três tipos: metálica, plástica de cor preta e plástica de cor vermelha, sendo todas de forma cilíndrica. Considera-se inicialmente que as peças brutas estarão armazenadas num único *buffer* de maneira aleatória, e no decorrer do processo deverão ser classificadas e armazenadas de acordo com alguns requisitos listados a seguir.

Após a furação das peças, nestas deverão ser executadas quatro montagens de quatro partes conforme ilustra a figura 6.1: uma mola, dois fixadores e dois parafusos (considerados como uma única parte), na seqüência que está representada na mesma figura. Considera-se que a peça bruta é fornecida ao sistema com os dois furos para os parafusos, assim como os fixadores já estão com os furos representados na figura executados. Dessa forma, a única furação a ser executada no SMMA será aquela relacionada ao furo da peça onde será acoplada a mola (ver figura 6.1).

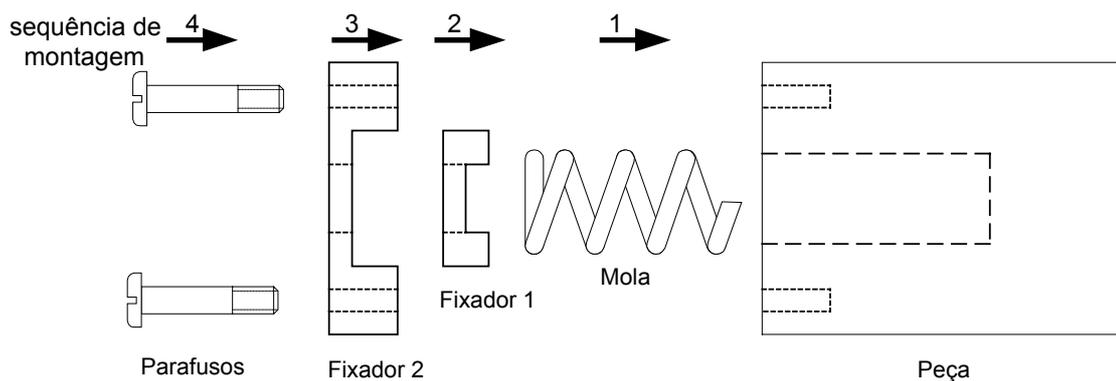


Figura 6.1 – Produto a ser processado e montado no SMMA em projeto.

As atividades a serem executadas pelo SMMA a ser construído podem ser identificadas, sem no entanto considerar ainda a seqüência mais adequada:

- 1.A furação da peça;
- 2.A classificação da peça quanto ao tipo;
- 3.A montagem da mola;
- 4.A montagem do primeiro fixador (menor);
- 5.A montagem do segundo fixador;
- 6.A colocação dos parafusos;
- 7.A embalagem das peças montadas nas correspondentes embalagens;
- 8.A armazenagem de acordo com requisitos do usuário.

Pode-se ainda citar como especificações adicionais desejáveis os seguintes requisitos descritos a seguir:

1.Em função de uma eventual não uniformidade de fabricação das peças, acarretando a existência de diferentes classes de tolerância dimensional, é necessário que exista um dispositivo de medição da dimensão de todas as peças, e que o sistema descarte aquelas que não se enquadram na tolerância desejada;

2.No processo de furação, por suas características, a quebra da broca é um evento possível de ocorrer, sendo necessário algum mecanismo que verifique a existência do furo ou ainda a correta execução da operação (o furo poderá estar inadequado). As peças sem furo ou com furo incompleto deverão também ser descartadas;

O sistema construído deverá ser totalmente automatizado, sendo a única intervenção humana possível a escolha da quantidade e o tipo de produto a ser armazenado, de acordo com a demanda externa. Especificações relacionadas à segurança, monitoramento, condições de emergência, estabelecimentos de ciclos (contínuo, condicionado, dentre outros) não serão tratados no presente trabalho, visto que este objetiva contribuir na estruturação inicial do sistema de controle

(supervisores e sistemas produtos), disponibilizando assim uma concepção de automação sem o detalhamento do programa, dos recursos e técnicas de programação. Da mesma forma, a estruturação física do sistema estará entre o abstrato e concreto, pois apesar de chegar-se aqui a configurações espaciais de princípios de soluções, não se tem ainda preocupações com dimensões, escalas, materiais, etc, interessando mais a concepção física do sistema em projeto que obedeça fielmente a descrição funcional elaborada. Consegue-se assim um dos objetivos anteriormente traçado para o presente trabalho, que é a representação objetiva do sistema desde as fases iniciais do projeto.

## 6.2 Estabelecimento da estrutura funcional global

A estrutura funcional global é definida a partir da identificação dos produtos de entrada e saída do sistema em projeto. Os produtos de entrada são aqueles utilizados ou consumidos pelo sistema enquanto que os produtos de saída são gerados pelas atividades de tal sistema. A seguir são descritos os produtos de entrada e saída do sistema e os seis grupos a serem classificados, embalados e armazenados e as respectivas notações:

- Produtos de entrada:

1. Peças brutas: peça\_1, peça\_2, peça\_3;
2. Partes a serem montadas (mola, fixadores e parafusos). Após a montagem destas partes nas peças, estas recebem a notação Pr1, Pr2 e Pr3, contendo a peça\_1, peça\_2 e peça\_3, respectivamente;
3. Embalagem: emb\_1 (capacidade para 03 peças), emb\_2 (capacidade para 06 peças) e emb\_3 (capacidade para 09 peças).

- Produtos de saída (Pr\_Ei):

1. PrE1 = Emb\_1 com as peças montadas [Pr1, Pr2, Pr3]
2. PrE2 = Emb\_1 com as peças montadas [Pr2, Pr3, Pr3]
3. PrE3 = Emb\_2 com as peças montadas [Pr1, Pr1, Pr2, Pr2, Pr3, Pr3]
4. PrE4 = Emb\_2 com as peças montadas [Pr2, Pr2, Pr2, Pr3, Pr3, Pr3]
5. PrE5 = Emb\_3 com as peças montadas [Pr1, Pr1, Pr1, Pr2, Pr2, Pr2, Pr3, Pr3, Pr3]
6. PrE6 = Emb\_3 com as peças montadas [Pr2, Pr2, Pr2, Pr3, Pr3, Pr3, Pr3, Pr1, Pr1]

A figura 6.2 ilustra a estrutura funcional global utilizando a notação em rede C/A, onde são identificados os canais de entrada e saída com os respectivos produtos e a agência genérica representando os processos, a manipulação e montagem do sistema a ser construído. Nota-se a existência de nove canais de entrada, cada um deles representando o local onde são armazenadas as peças brutas, as embalagens, as partes (fixadores e parafusos) e as molas. Já os canais de saída são

em seis, cada um deles representando o local de armazenagem de acordo com o tipo de produto. Pode-se notar claramente que esta estrutura está num nível ainda bastante abstrato, pois decisões como a separação das embalagens em diferentes canais ou um local único para as partes (fixadores e parafusos) e as molas, não foram ainda estabelecidas. Esta estrutura identifica os produtos de entrada e saída, e não estabelece ainda a estrutura inicial.

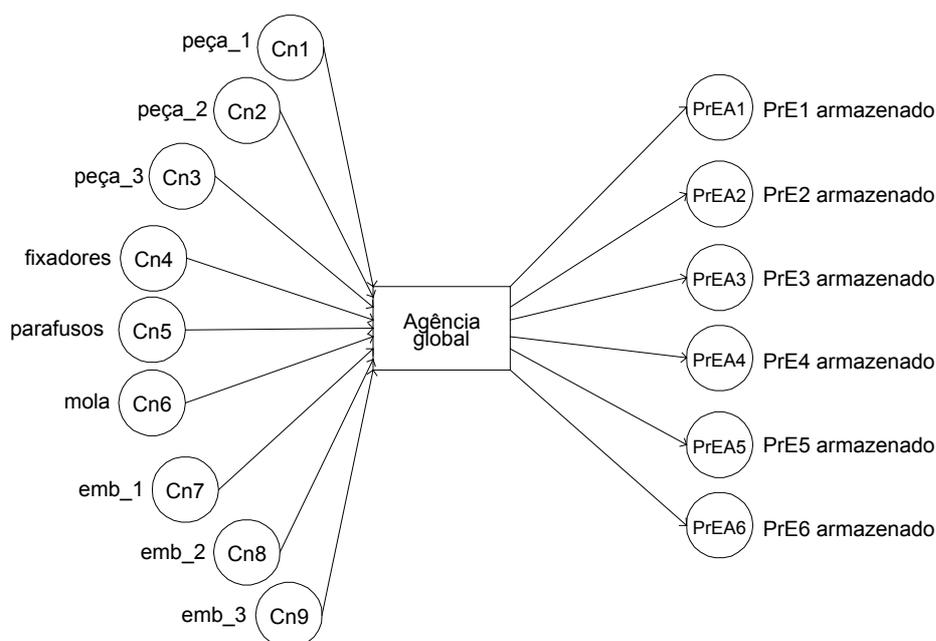


Figura 6.2 – Estrutura funcional global do SMMA em projeto.

### 6.3 Refinamento da estrutura funcional global (decomposição funcional)

De acordo com as atividades do sistema identificadas na etapa de especificação, a estrutura funcional global apresentada na figura 6.2 é refinada. Visando a uma melhor apresentação do processo de decomposição, são consideradas duas sub-estruturas do sistema em projeto: a primeira engloba os processos de medição dimensional, furação e teste e classificação; a segunda engloba as operações de montagem, embalagem e armazenagem dos produtos. Inicialmente, considerando a sequência e os produtos envolvidos nas diferentes operações, pode-se obter a estrutura mostrada na figura 6.3, referida à primeira parte do sistema projetado. Nesta estrutura, foram tomadas as seguintes decisões de projeto:

- Na etapa de especificação, foi estabelecido que as peças brutas (peça\_1, peça\_2, peça\_3) seriam armazenadas na entrada do sistema de forma aleatória. Dessa forma, os canais Cn1, Cn2 e Cn3 são condensados, tornando-se um único canal de entrada no sistema;

- A medição da dimensão das peças é o primeiro processo a ser executado nas peças brutas, evitando assim que eventuais peças em não conformidade com as tolerâncias definidas sejam processadas. Para tanto, é necessário que as peças com dimensão inadequada sejam imediatamente descartadas antes de sofrerem outro(s) processo(s);

- O transporte das peças classificadas para os respectivos canais de armazenagem é realizado logo após a verificação do tipo de peça, evitando assim os problemas de controle (fluxo de informações) apresentados no capítulo 5. Supõe-se desta forma que o processamento, furação e teste são independentes do tipo de peça.

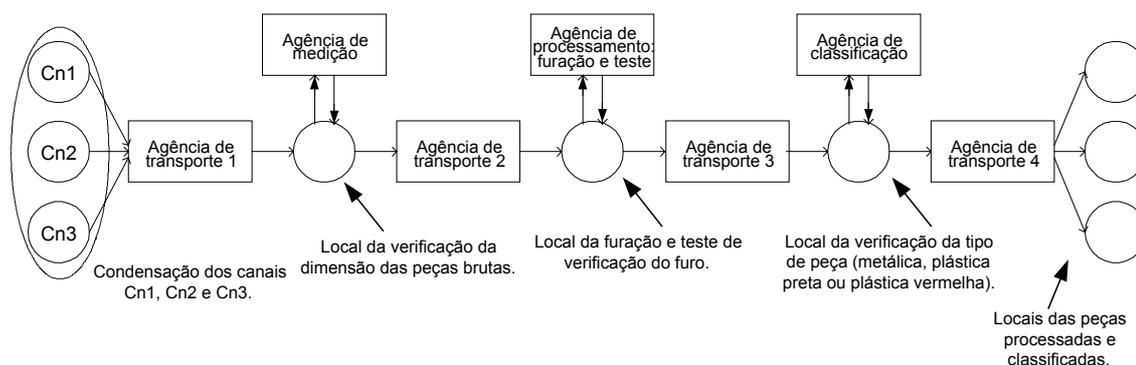


Figura 6.3- Primeira estrutura funcional obtida a partir do processo de refinamento da estrutura global mostrada na figura 6.2.

A segunda parte da estrutura funcional, que engloba os processos de montagem, embalagem e armazenagem, é apresentada na figura 6.4. Nesta, as seguintes decisões de projeto foram estabelecidas:

- Os produtos montados são posteriormente colocados em canais correspondentes, mantendo assim a identificação do tipo de produto de acordo com o local físico onde estão armazenados;
- As embalagens (emb\_1, emb\_2 e emb\_3) são inicialmente armazenadas em canais diferentes, de acordo com a capacidade de cada uma;
- A agência de transporte que retira os produtos montados dos respectivos canais fará o depósito dos mesmos nas respectivas embalagens;
- O canal onde ocorrerá a embalagem dos produtos montados tem capacidade unitária em relação a embalagem, sendo assim apenas uma por vez recebe os produtos montados;
- Cada produto embalado é depositado num canal diferente, existindo seis canais com produtos finais de acordo com a classificação apresentada na seção 6.2.

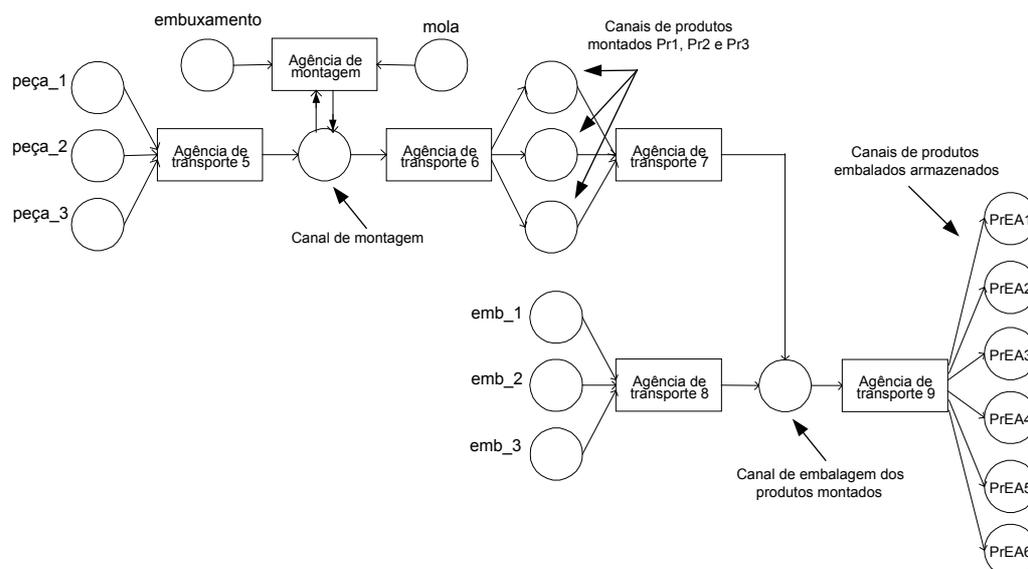


Figura 6.4 – Primeira estrutura funcional obtida a partir do refinamento da agência global mostrada na figura 6.2.

Seguindo o processo de refinamento funcional, o projetista identificará quais agências e/ou canais poderão ser refinados ou condensados. No caso da sub-estrutura apresentada na figura 6.3, alguns aspectos podem ser destacados de forma a conduzir a decomposição de forma sistemática:

i) As agências de transporte 1 e 2 podem ser refinadas de forma a identificar outro canal. Reportando-se ao capítulo 4, essa técnica é importante no momento de selecionar princípios de solução, uma vez que facilita a tarefa de ajustar as configurações espaciais (variantes de concepção) dos diversos dispositivos;

ii) A agência de furação e teste pode ser refinada em duas agências, visto que, além de ser natural que o teste seja realizado após a furação, que seja realizado por um dispositivo distinto e não pelo próprio mecanismo de furação;

iii) É recomendável que a agência de transporte 4 seja refinada de forma a surgir um novo canal, facilitando a configuração do mecanismo de transporte. Caso contrário, a captura das peças classificadas se daria no próprio canal onde acontece a classificação, acarretando eventuais dificuldades de configuração de montagem.

A partir destas considerações, pode-se obter a estrutura funcional como apresentada na figura 6.5, englobando as operações já definidas na estrutura da figura 6.3.

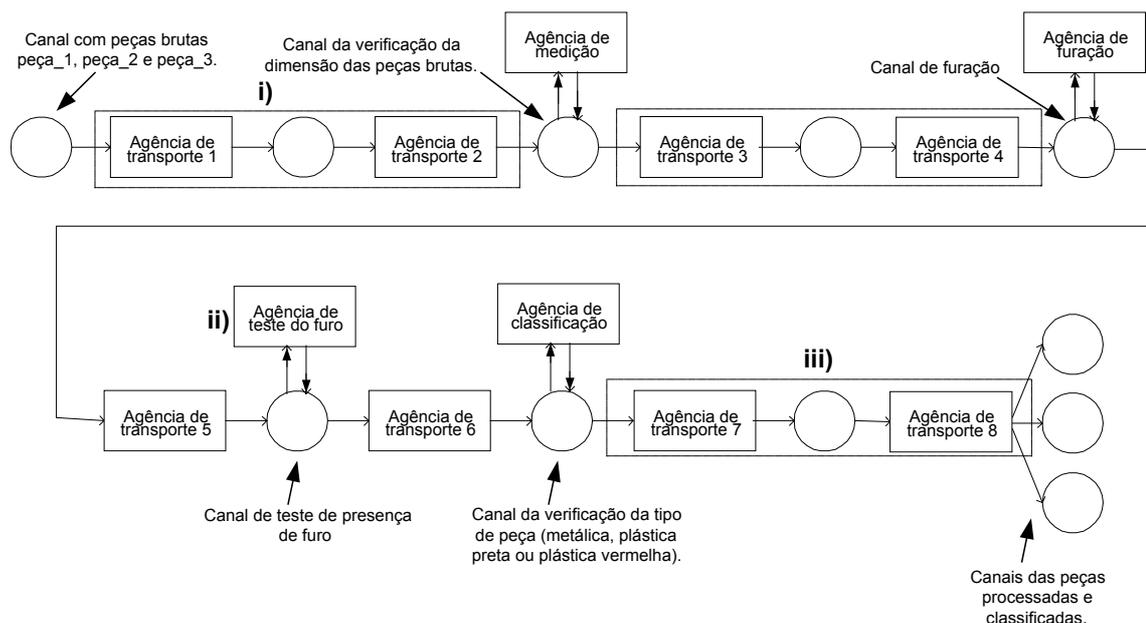


Figura 6.5 – Segunda estrutura funcional obtida a partir do refinamento da estrutura apresentada na figura 6.3.

O refinamento da sub-estrutura mostrada na figura 6.4 também seguirá de forma semelhante à primeira sub-estrutura, ou seja, o projetista identifica novos canais e/ou agências de forma a buscar representações mais concretas para o sistema em projeto. Nesse caso, os seguintes aspectos devem ser considerados:

i) As atividades de montagem podem ser executadas em quatro canais, um alocado para cada produto de entrada da respectiva agência: o primeiro canal para a montagem da mola, o segundo e o terceiro para os fixadores e o quarto para o parafusamento. Opta-se por uma estrutura em que as partes sejam montadas em dois canais, ou seja, duas agências realizam a montagem das quatro partes;

ii) Seguindo a mesma recomendação de refinar uma agência de transporte para diminuir a complexidade de configuração e montagem dos princípios de solução, faz-se isto na agência de transporte 6;

iii) Antes da embalagem chegar no canal de embalagem, a mesma deverá estar aberta, devendo portanto existir uma agência que execute a operação de abertura;

iv) Antes da embalagem chegar ao respectivo canal de armazenagem, ela deverá estar fechada, devendo existir portanto uma nova agência que realize a operação de fechamento;

v) É recomendável também o refinamento da agência 5 de forma a surgir um novo canal sem atividade, da mesma forma diminuindo a complexidade posterior de configuração e montagem dos diversos mecanismos selecionados.

Chega-se então a estrutura funcional apresentada na figura 6.6, que considera os aspectos mencionados anteriormente.

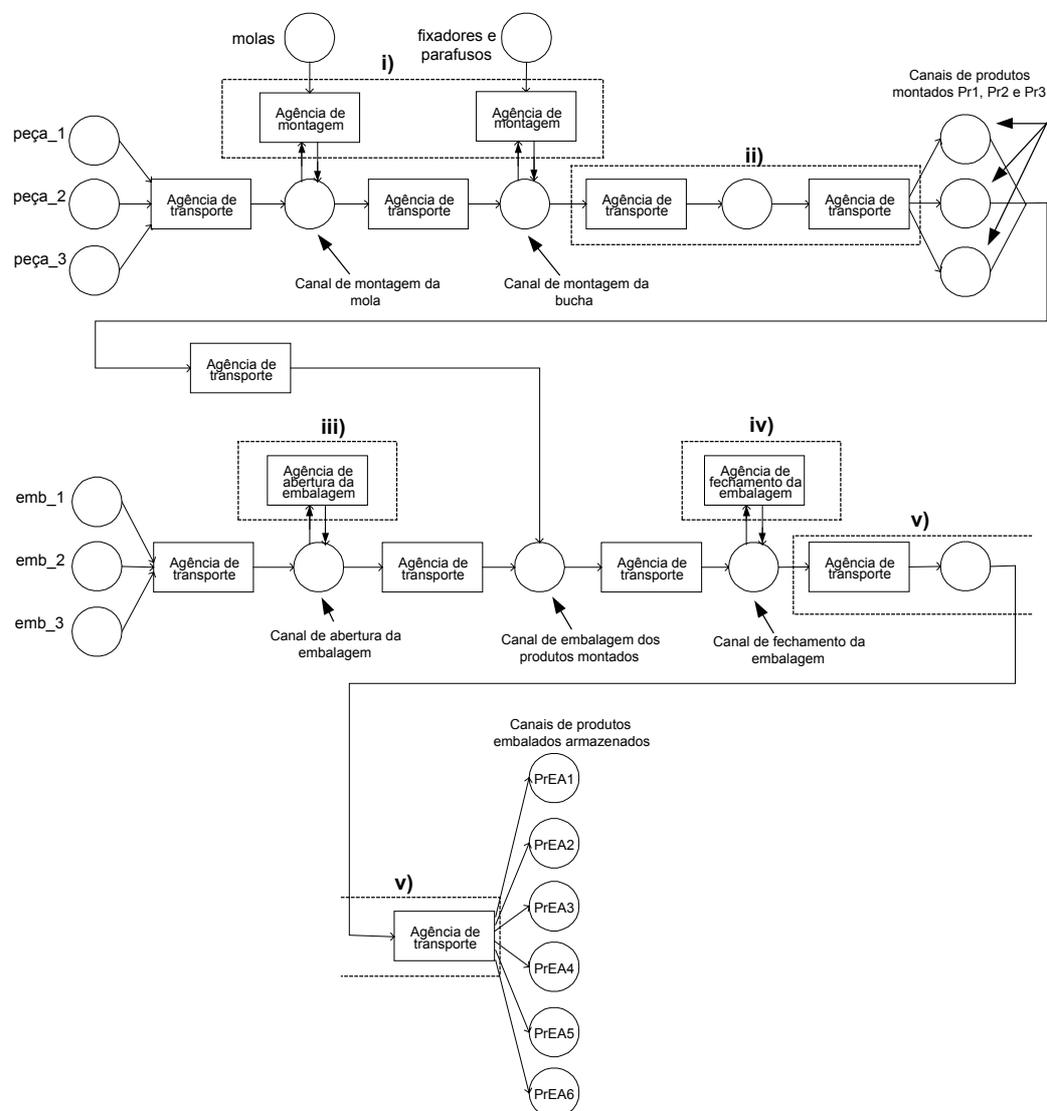


Figura 6.6 – Segunda estrutura funcional obtida a partir do refinamento da estrutura apresentada na figura 6.4.

#### 6.4 Estabelecimento das variantes de estruturas funcionais

Observou-se na etapa anterior que as estruturas funcionais obtidas obedecem a certas restrições impostas pelo projetista, na forma de decisões de projeto. Pode-se rapidamente concluir que inúmeras estruturas podem ser estabelecidas caso certas restrições desapareçam ou sejam substituídas por outras. Conforme descrito no capítulo 4, as variantes de estruturas funcionais podem ser obtidas através das seguintes formas:

- Diferentes configurações da rede C/A, sendo realizadas através da decisão do projetista por determinada configuração de acordo com as restrições impostas pelo mesmo;

- Definição de variantes (tipos) das agências nas redes. Nesse caso, pode-se manter a mesma rede C/A modificando apenas os tipos de agências na estrutura;

- Através da combinação das duas formas acima descritas.

De qualquer maneira, qualquer modificação inserida numa estrutura funcional implicará numa modificação das especificações operacionais associadas, conforme discutido no capítulo 5. Por esta razão, é importante que as variantes de estruturas sejam cuidadosamente estabelecidas, documentadas e analisadas. As figuras 6.7, 6.8 e 6.9 a seguir ilustram três variantes de estrutura funcionais daquela mostrada na figura 6.5. A primeira, mostrada na figura 6.7, tem as seguintes características que a diferenciam da estrutura original (figura 6.5):

- Inexistem os dois canais sem atividades previstos no processo de refinamento (entre as agências de transporte 1 e 2 e entre 3 e 4). Nesse caso, o projetista busca um sistema compacto, com poucos mecanismos de atuação;

- A classificação (em relação ao tipo de peça bruta) é prevista para ser realizada no início do sistema;

- A rejeição das peças seja por dimensão inadequada ou por falta de furo é realizada pela última agência de transporte;

- As agências de transporte sombreadas representam a mesma agência, ou seja, a implementação se dará pelo mesmo princípio de solução.

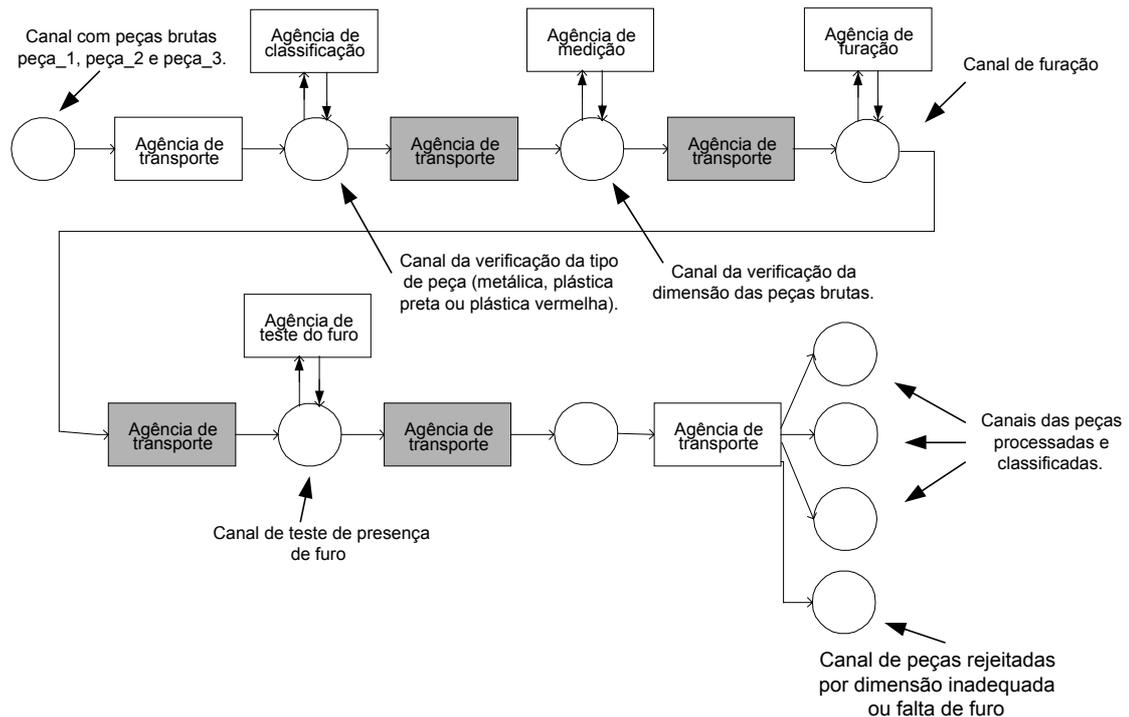


Figura 6.7 - Primeira variante da estrutura funcional apresentada na figura 6.5.

A segunda variante funcional, por sua vez, apresenta as seguintes características que a diferenciam da estrutura funcional mostrada na figura 6.5 e que é apresentada na figura 6.8:

- A rejeição das peças ou partes por dimensão inadequada (informação obtida através da agência de medição) é realizada através da agência de transporte imediatamente posterior à extração da informação, surgindo com isto um novo canal;
- Os canais onde ocorrem os processos de furação, teste do furo e classificação são servidos pela mesma agência (está sombreada na figura 6.8), ou seja, serão implementadas por um mesmo princípio de solução;
- A rejeição das peças ou partes por execução de furo inadequado é realizada através da última agência de transporte da estrutura, surgindo um novo canal de depósito de tais peças.

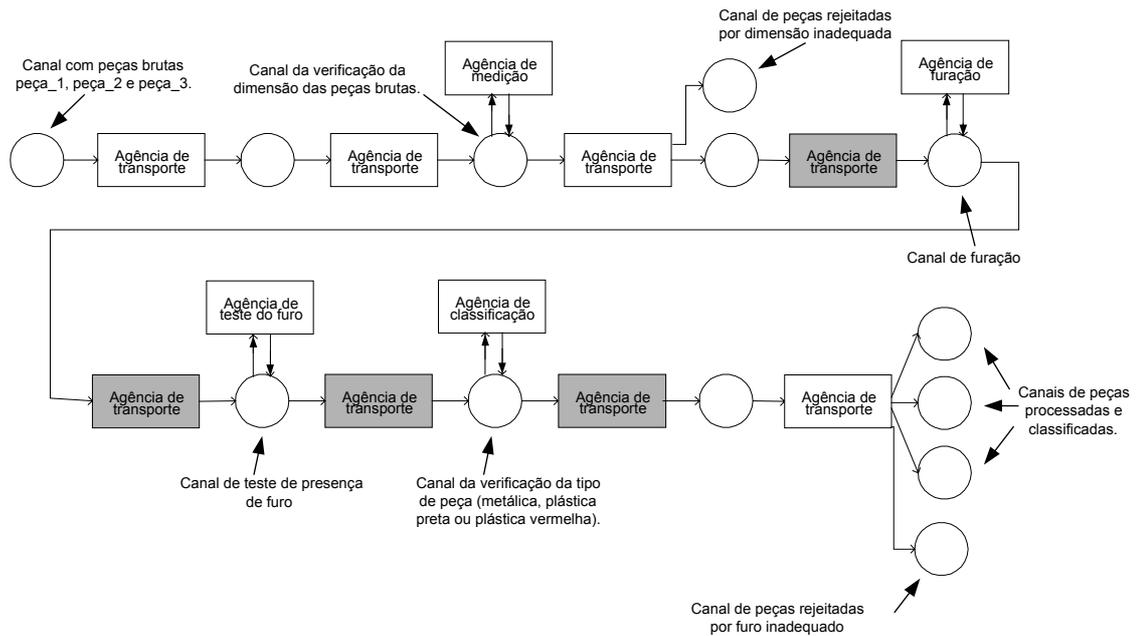


Figura 6.8 – Segunda variante da estrutura funcional apresentada na figura 6.5.

A figura 6.9 mostra a terceira variante funcional com respeito à estrutura apresentada na figura 6.5. As seguintes restrições foram impostas pelo projetista neste caso:

- A classificação é realizada antes da medição e da furação;
- A rejeição das peças é realizada logo após a medição por uma nova agência de transporte que deposita tais peças no canal Cn4;
- Os canais onde ocorrem os processos de furação e teste do furo são servidos pela mesma agência (está sombreada na figura 6.9);
- A rejeição das peças ou partes por execução de furo inadequado é realizada através da última agência de transporte da estrutura, surgindo um novo canal de depósito de tais peças.

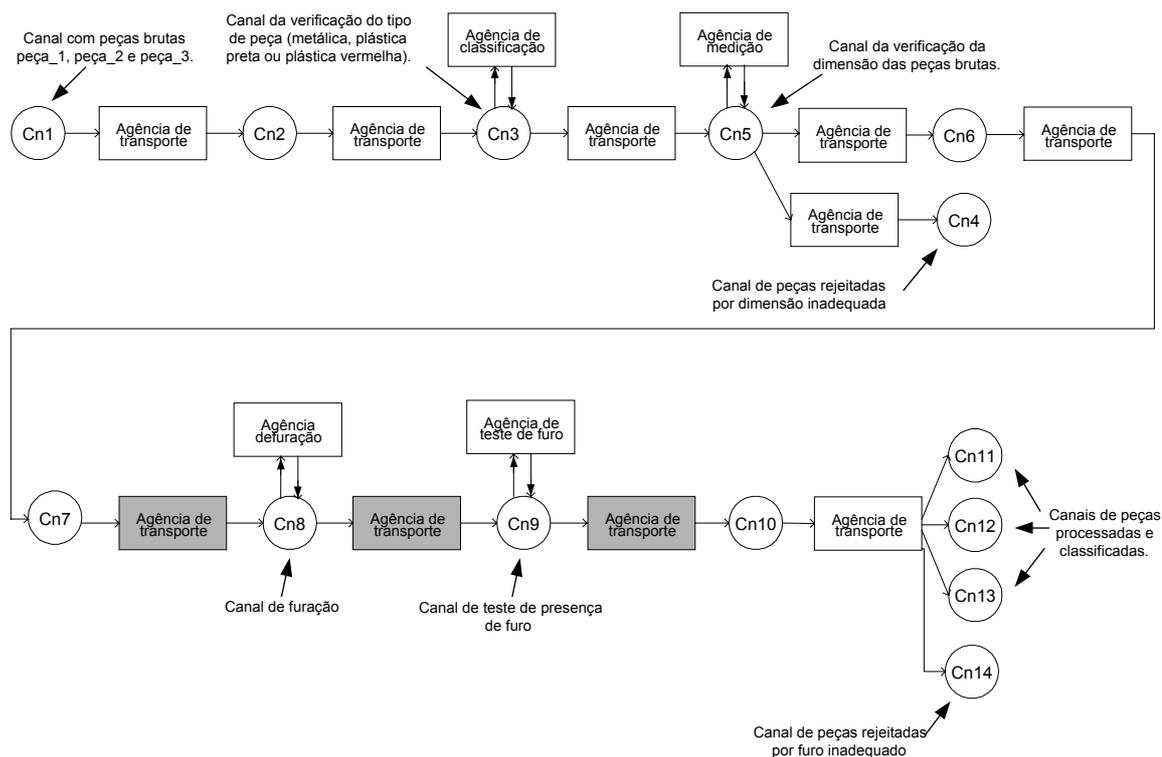


Figura 6.9 – Terceira variante da estrutura funcional apresentada na figura 6.5.

A figura 6.10 mostra a primeira variante funcional daquela mostrada na figura 6.6 (que engloba as atividades de montagem, depósito e armazenagem), apresentando as seguintes características que a diferenciam da estrutura da figura 6.6:

- Os canais onde ocorrem os processos de montagem são servidos por uma mesma agência de transporte (sombreada na figura 6.10), que tem características já descritas;
- A captura das peças furadas é executada por uma agência de transporte que as coloca num único canal anterior ao primeiro processo de montagem;
- O produto final montado é depositado num único canal, diferentemente da estrutura mostrada na figura 6.6 onde existiam três canais de depósito (cada um servindo um tipo de produto montado);
- Os canais onde ocorrem a abertura da embalagem, o depósito de peças montadas e o fechamento das embalagens são servidos pela mesma agência de transporte (sombreada na figura 6.10).

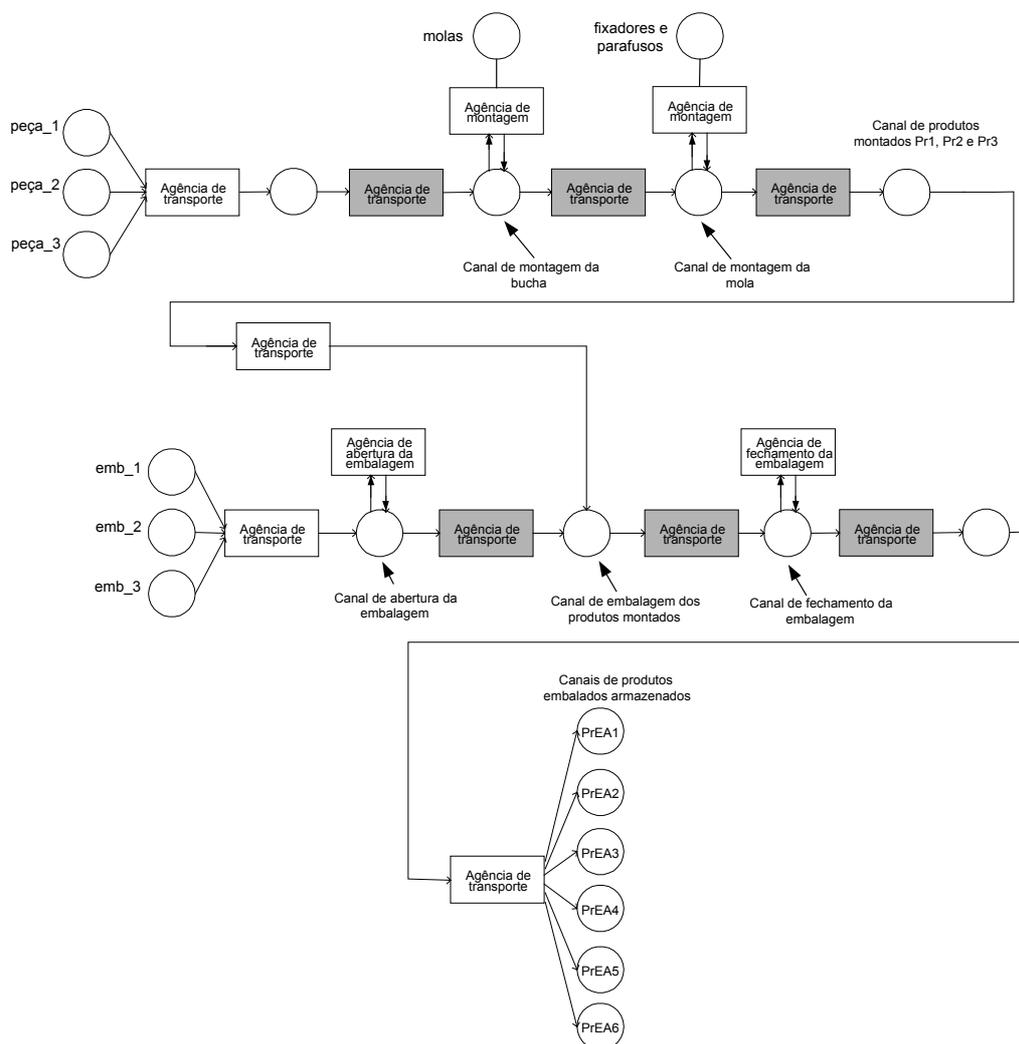


Figura 6.10 – Primeira variante da estrutura funcional mostrada na figura 6.6.

A figura 6.11 apresenta a segunda variante da estrutura funcional apresentada na figura 6.6, com as seguintes características que a diferenciam desta:

- i) Existe uma única agência de montagem da mola, dos fixadores e dos parafusos;
- ii) A agência de transporte retira dos canais de produtos montados (um para cada tipo de peça) e deposita-as na embalagem no canal correspondente a esta atividade (canal de embalagem);
- iii) Os canais de abertura da embalagem, depósito de produtos montados e fechamento da embalagem são servidos por uma mesma agência (sombreadas na figura 6.11).

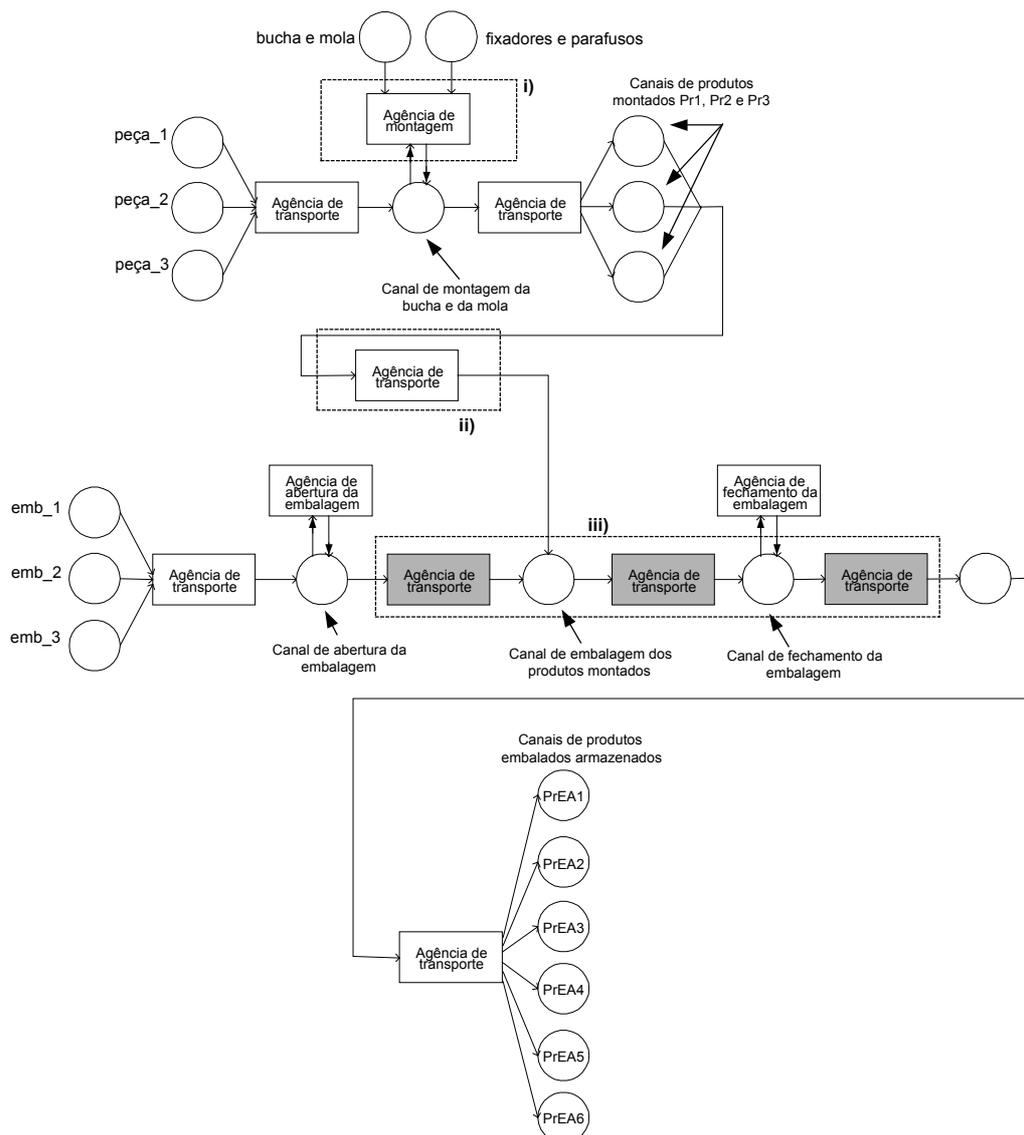


Figura 6.11 – Segunda variante da estrutura funcional mostrada na figura 6.6.

### 6.5 Seleção da estrutura funcional, modelagem das agências e especificações operacionais

Nesta etapa o projetista seleciona a estrutura funcional mais promissora sob o ponto de vista estrutural e de controle, que acarrete no cumprimento do objetivo global do sistema em projeto da forma mais adequada possível. Em relação à estruturação física, o projetista tomará a decisão baseado na criatividade e intuição, visto que até este momento a representação está num nível bastante abstrato, apesar de a descrição funcional aqui tratada impor restrições de configuração. Sob o ponto de vista da estruturação do sistema de controle, apesar do nível elevado de abstração física, aqui o projetista poderá estabelecer a configuração mais adequada. Faz-se isso através dos modelos de especificações associadas a configurações em rede C/A do SMMA em projeto

apresentadas no capítulo 5, independente se foi ou não estabelecido um conjunto de soluções para as agências.

Na verdade, a modelagem utilizada (autômatos e linguagens) acompanha o nível de abstração desta fase de projeto, pois os modelos naturalmente têm o poder de encapsular informações ainda não definidas. Por exemplo, o modelo de dois estados para uma agência engloba um possível comportamento desta (o estado que é alcançado após o evento  $\alpha$  poderá representar a execução de diversos atuadores que cumprem o objetivo da agência) e ao mesmo tempo é independente de existirem ou não dispositivos que representem tal comportamento.

Em relação à estrutura funcional que engloba os processos de medição, furação, teste e classificação, apresentada em forma de variantes nas figuras 6.7, 6.8 e 6.9, os seguintes aspectos são considerados para fins de seleção:

- A classificação das peças ou partes realizada no início do sistema (figuras 6.7 e 6.9) para utilização desta informação no final para seleção do canal de peças rejeitadas acarreta uma maior complexidade na modelagem das agências e especificações, conforme descrito no capítulo 5. Este fato conta negativamente para a seleção destas variantes de estrutura funcional. Por sua vez, na estrutura apresentada na figura 6.8 considera-se que a classificação é realizada um canal antes da agência de transporte selecionar o canal adequado de produtos processados, acarretando além de uma menor complexidade de modelagem, um menor esforço de memória no CLP (qualquer que seja a forma de implementação);

- Conforme já mencionado, é recomendável prever-se um canal intermediário (sem atividade) quando existir a situação de duas agências não equivalentes com atividade, de forma a diminuir o posterior esforço de busca por princípios de soluções e configuração espacial da junção destes. Nesse sentido, dificuldades de configuração podem surgir caso se opte pela estrutura funcional apresentada na figura 6.7. Por outro lado, as estruturas apresentadas nas figuras 6.8 e 6.9 são caracterizadas por tais requisitos, tornando o trabalho posterior de seleção de variantes de montagens mais simples e com maior flexibilidade;

- As estruturas mostradas nas figuras 6.8 e 6.9 apresentam ainda a vantagem em relação à rejeição de peças em função da inadequação da dimensão, pois o descarte é feito pela agência de transporte imediatamente após a agência de medição. Pode-se observar a inclusão de um novo canal que será utilizado para peças rejeitadas. A vantagem diz respeito à estrutura de controle, no sentido de economia de esforço computacional de construção e operação;

Em relação à estrutura funcional que engloba as atividades de montagem, abertura e fechamento da embalagem, depósito dos produtos montados e armazenagem de produtos embalados, mostrada em forma de variantes nas figuras 6.10 e 6.11, os seguintes aspectos são considerados no sentido de selecionar a estrutura mais adequada:

- A diferença fundamental entre as duas estruturas é em relação ao tamanho da subestrutura funcional que engloba a montagem da mola, dos fixadores e parafusos. Na primeira, mostrada na figura 6.10, esta atividade é executada por duas agências, cada uma montando um dos produtos; a segunda, mostrada na figura 6.11, utiliza apenas uma agência de montagem. Além disso, a subestrutura apresentada na figura 6.10 utiliza agências de transporte similares que atendem os canais onde ocorrem as operações de montagem. A decisão por utilizar uma ou outra se dará em grande parte em função de qual princípio de solução será selecionado. Na verdade, aqui se caracteriza outro projeto, no que diz respeito a obtenção de mecanismos de montagem automatizados e do próprio projeto do produto (a peça principal, a mola, os fixadores e os parafusos) voltado a esta situação;

- Ainda sobre a subestrutura funcional que engloba a atividade de montagem, a opção pela variante apresentada na figura 6.11 acarreta um menor esforço de programação e operação do controle, visto que a informação sobre o tipo de produto montado é utilizada logo em seguida à montagem pela agência de transporte, que por sua vez deposita cada produto no canal correspondente. Em seguida, a agência de transporte posterior a estes canais captura o tipo de produto requisitado e deposita-o na embalagem. Em contrapartida, a opção pela estrutura mostrada na figura 6.10 acarreta uma maior complexidade na estrutura de controle, visto que a informação relativa ao tipo de produto a ser montado deverá percorrer a estrutura até a agência de transporte que realiza o depósito (problema apresentado no capítulo 5);

- No que diz respeito à subestrutura que engloba as atividades de abertura e fechamento das embalagens e do depósito dos produtos naquelas, nenhuma diferença pode ser observada. Há de se ressaltar que inevitavelmente ter-se-á que incluir na estrutura de controle uma fila de informações relacionadas ao tipo de embalagem, a correspondência destas com os produtos embalados requisitados e os locais de armazenagem destes. Estas informações serão utilizadas por três agências de transporte, onde a partir do tipo de produto selecionado cada uma delas tomará uma decisão operacional;

- Sobre as atividades de montagem, é importante ressaltar que considerar uma única agência de montagem das quatro partes na peça furada significa optar por um princípio de solução complexo e conseqüentemente de custo elevado. A montagem automatizada é menos complexa e mais viável economicamente caso de adote uma estratégia de divisão de esforços, ou seja, mecanismos mais simples executando cada uma das montagens requeridas.

A partir destas considerações, decide-se aqui optar pelas subestruturas funcionais mostradas nas figuras 6.9 e 6.10, ambas formando então o sistema em projeto global. A tarefa seguinte é a modelagem das agências e especificações, temas tratados nos capítulos 4 e 5 respectivamente. Considerando ainda, conforme discutido no capítulo 5, que o fluxo de informações é tratado numa outra estrutura de controle e no contexto de projeto, num outro momento, as agências são

modeladas através do autômato de dois estados e as especificações operacionais são extraídas do conjunto apresentado no capítulo 5.

A figura 6.12 ilustra novamente a estrutura mostrada na figura 6.9, nomeando os eventos relacionados às agências. Por sua vez, a figura 6.13 apresenta as especificações operacionais esperadas deste sistema, já garantida a controlabilidade e a modularidade das linguagens resultantes do processo de síntese (propriedades analisadas no capítulo 5).

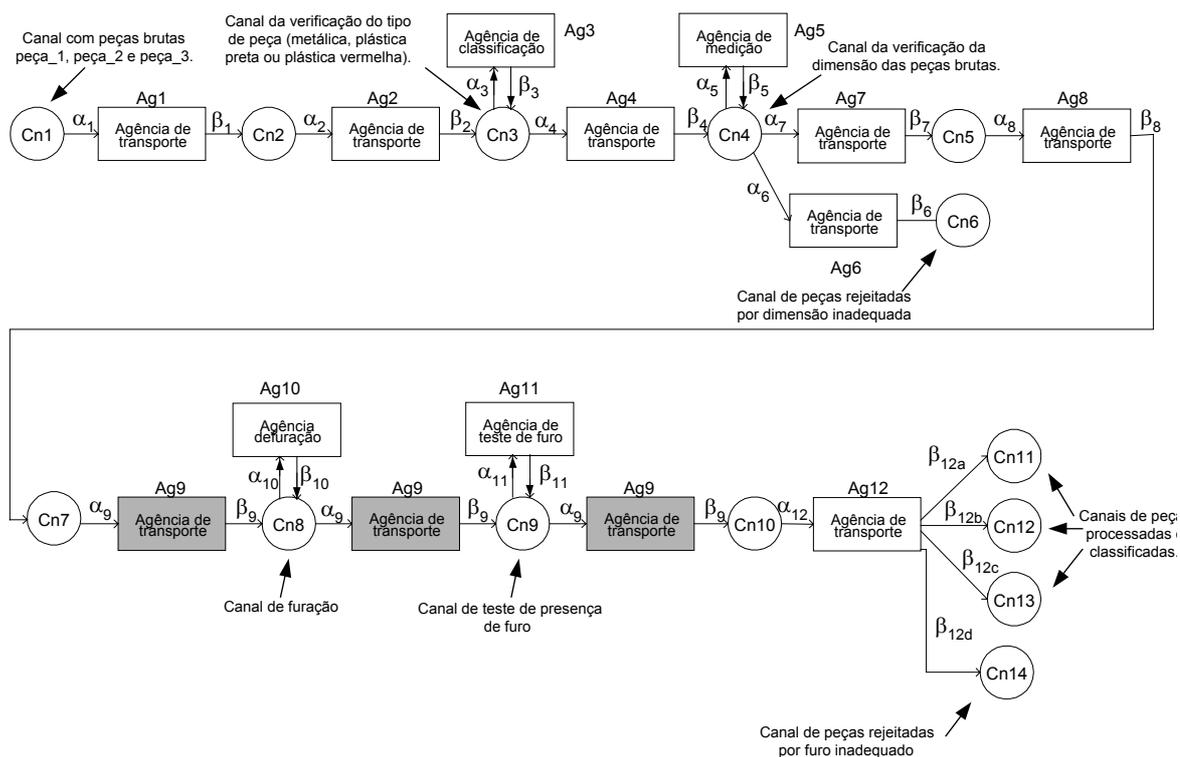


Figura 6.12 – Estrutura funcional selecionada, englobando as atividades de classificação, furação, teste e medição das peças.

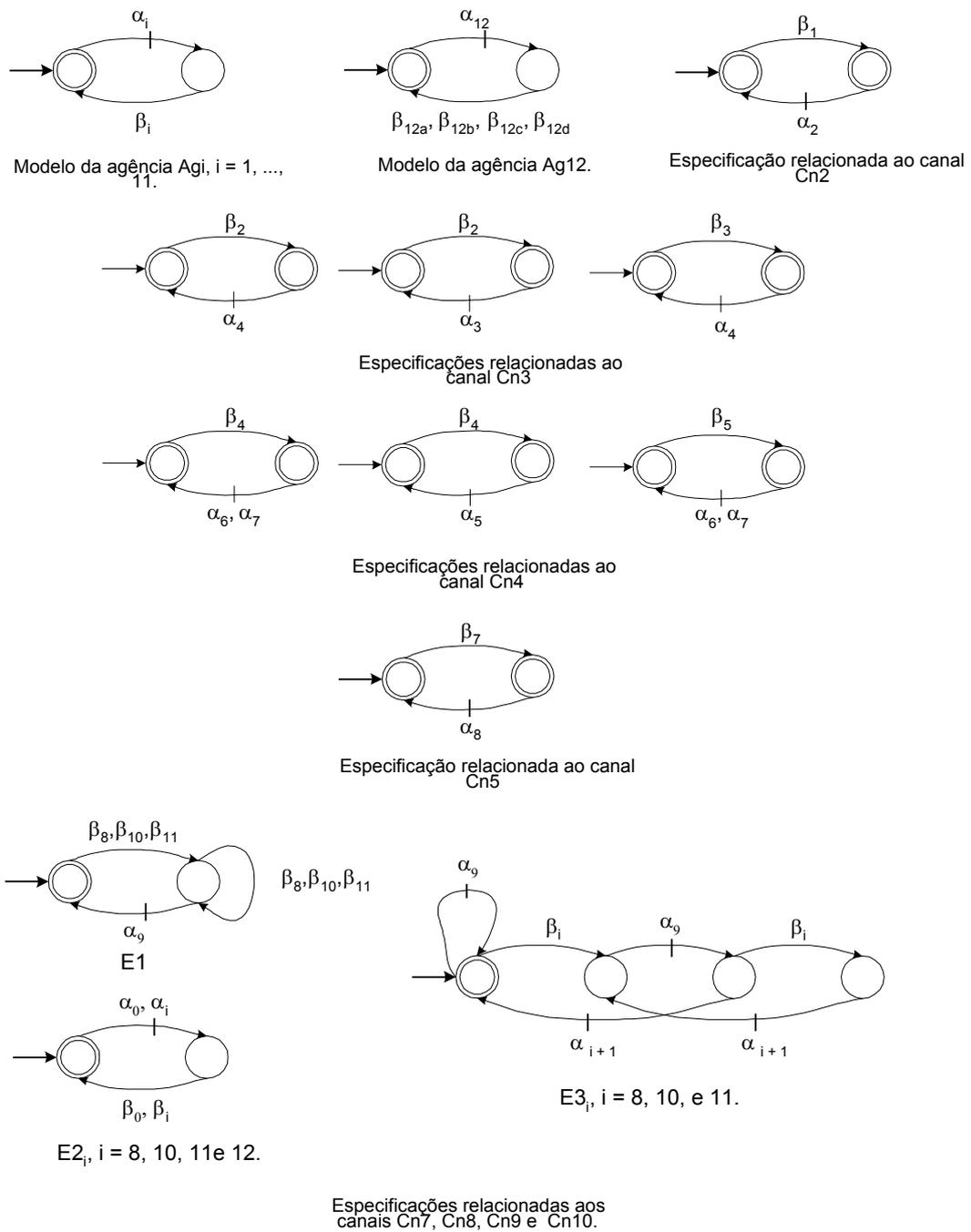


Figura 6.13 – Modelos das agências e das especificações operacionais relacionadas a estrutura funcional apresentada na figura 6.12.

A figura 6.14 ilustra a estrutura anteriormente apresentada na figura 6.10, nomeando os eventos relacionados a cada uma das agências do sistema em projeto. Em seguida, a figura 6.15 mostra as especificações operacionais deste sistema, de acordo com os modelos apresentados no capítulo 5.

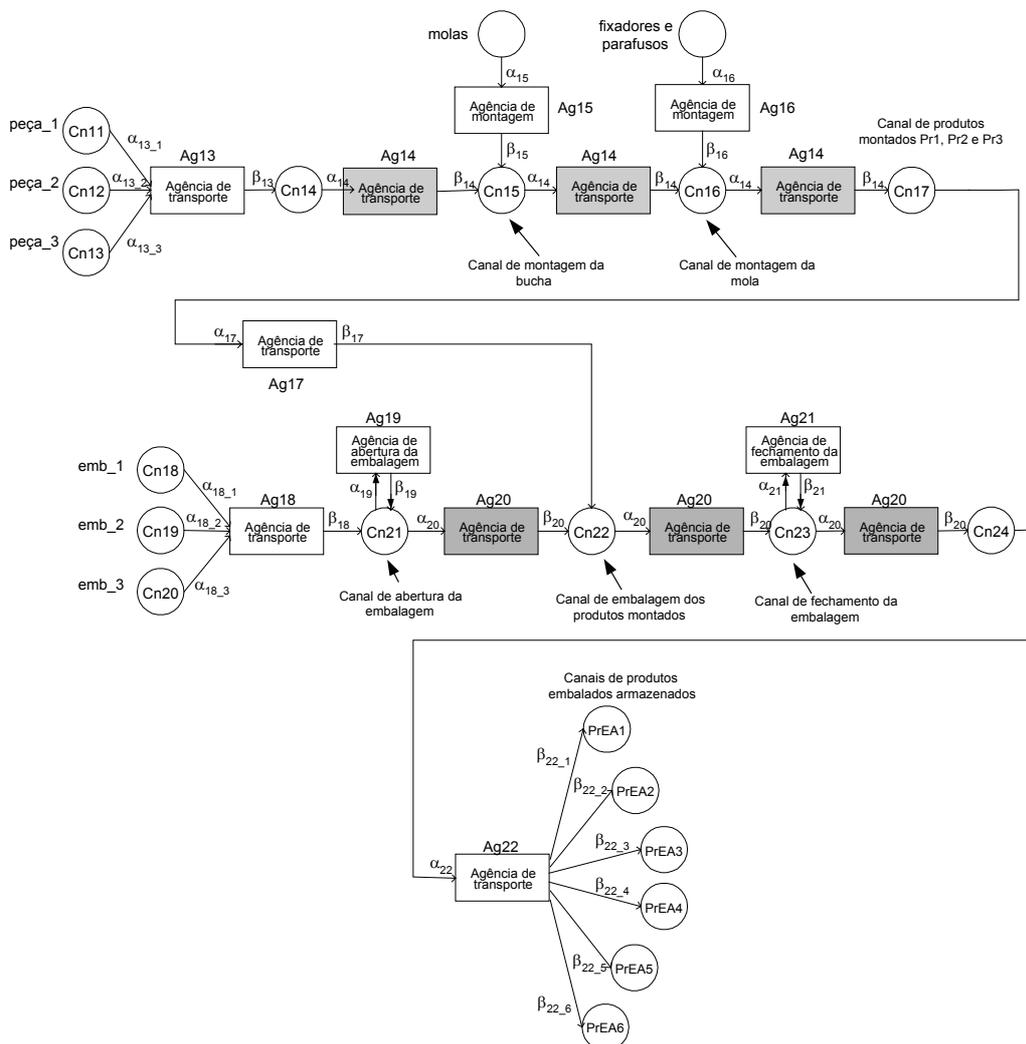


Figura 6.14 –Estrutura funcional selecionada, englobando as atividades de montagem, depósito, abertura e fechamento da embalagem e armazenamento.

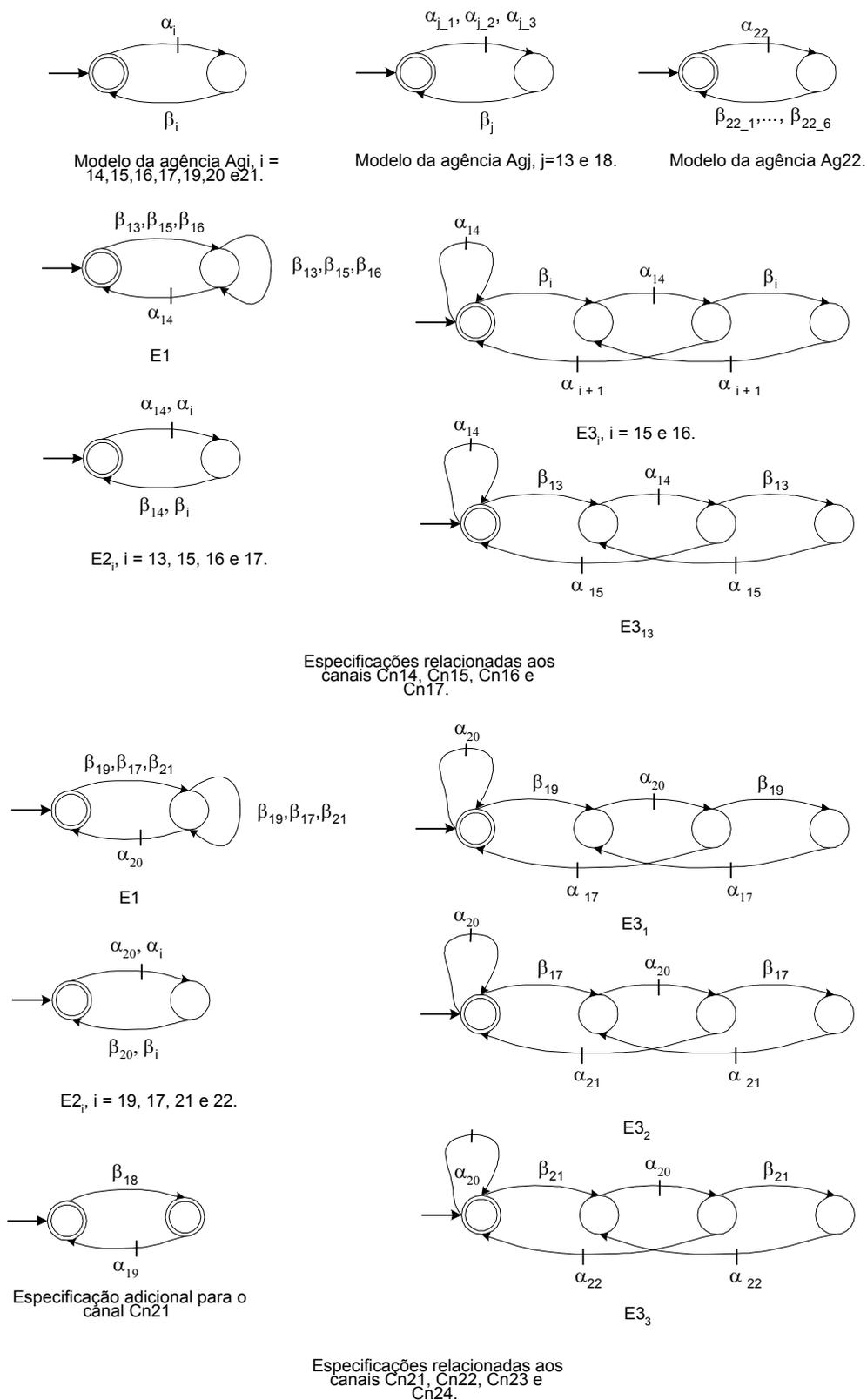


Figura 6.15 – Modelos das agências e das especificações operacionais relacionadas a estrutura funcional da figura 6.14.

O resultado desta fase é então a descrição funcional do sistema em projeto, que engloba a estrutura funcional em si e os modelos das respectivas agências e especificações operacionais sobre os canais. Por sua vez, tais modelos geram os supervisores que restringirão o comportamento do sistema de acordo com as especificações dadas, conforme todo o procedimento de síntese apresentado no capítulo 3. Tem-se assim a estrutura de controle inicial, composta dos sistemas produto (modelos das agências) e dos supervisores. Por outro lado, observa-se que nesta fase não estão definidos os princípios de solução para cada uma das agências.

## **6.6 Estabelecimento dos princípios de solução e das seqüências operacionais**

Dentro do contexto de projeto de engenharia, após o estabelecimento da estrutura de funções buscam-se princípios de soluções para as várias agências. Conforme discutido no capítulo 4, um princípio de solução deve refletir o comportamento necessário da agência de forma que esta cumpra o objetivo pré-estabelecido. Foi citado também que os métodos e ferramentas utilizadas na busca por princípios de solução não serão abordados no presente trabalho, pois não se enquadram no objetivo do mesmo.

Dessa forma, considera-se aqui que esta atividade é realizada principalmente através de catálogos de projeto, banco de dados de soluções e análise de sistemas existentes. Importante ressaltar que os modelos de soluções apresentados, mesmo que em alguns casos numa forma um tanto quanto abstrata, são adequados à fase de projeto aqui tratada, uma vez que não necessitam de maiores detalhes quanto à forma e dimensão. Entretanto, em função da representação estrutural imposta pela rede C/A, é necessário que a configuração espacial dos princípios de soluções selecionados reflita os canais de interligação das agências na estrutura funcional.

No intuito de ilustrar esta atividade, mostrar-se-á a seguir um possível conjunto de soluções para as agências apresentadas na estrutura funcional da figura 6.12. Em função do tamanho das ilustrações, a estrutura funcional da figura 6.12 será dividida em quatro partes, cada uma relacionada a um conjunto de soluções. A figura 6.16 mostra a primeira parte da estrutura funcional com os correspondentes princípios de soluções para cada agência, respeitando a interligação entre os canais e as agências na estrutura funcional.

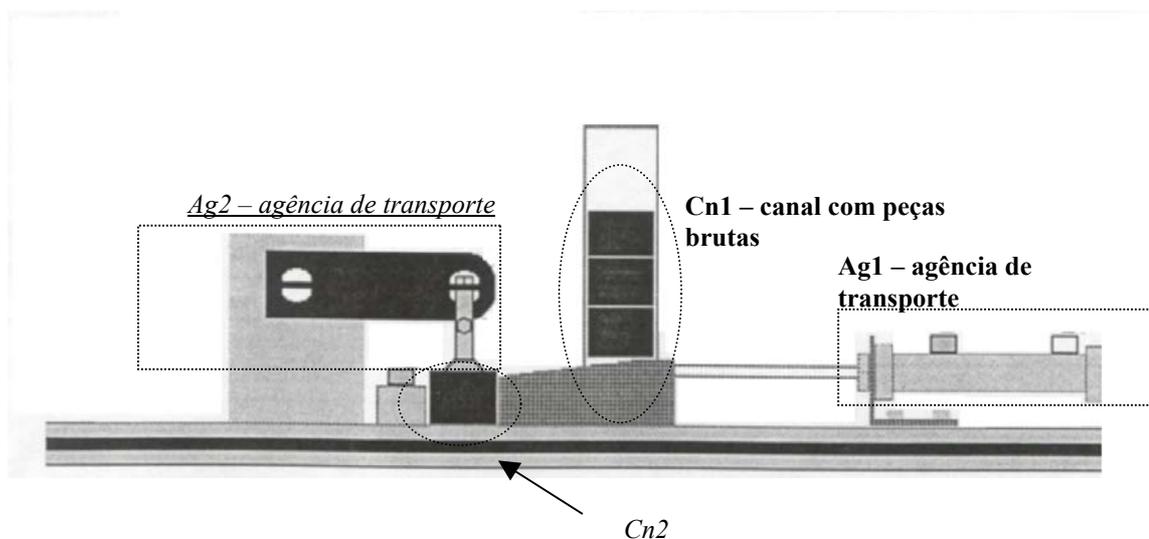


Figura 6.16 – Princípios de solução para as agências Ag1 (atuador pneumático linear) e Ag2 (atuador pneumático rotativo).

A figura 6.17 mostra a segunda parte da estrutura funcional, englobando as atividades de classificação e medição e os canais correspondentemente. Observa-se aqui que a agência que realiza a classificação das peças é ativa, pois a medição dos atributos é realizada sem a necessidade de um comando, mas apenas com a presença de peça no canal correspondente. Dessa forma, a agência de medição Ag3 (figura 6.17) será condensada à agência anterior Ag2 (figura 6.17) conforme descrito na seção 5.2 do capítulo 5. A implicação deste fato no sistema de controle é que a medição só é possível de ser evitada através da desabilitação do evento  $\alpha_2$ .

O mesmo acontece com a agência de medição dimensional, cuja solução selecionada é um transdutor analógico de deslocamento que está com a haste de contato previamente estendida. Dessa forma, não é necessário nenhum comando para a realização da medição, sendo necessário apenas que a agência de transporte anterior (atuador sem haste) leve a peça até o canal onde ocorrerá o contato com a haste do sensor. Na próxima fase do projeto conceitual, são discutidos os casos onde a estrutura funcional original se modifica em função de conjuntos de soluções específicos.

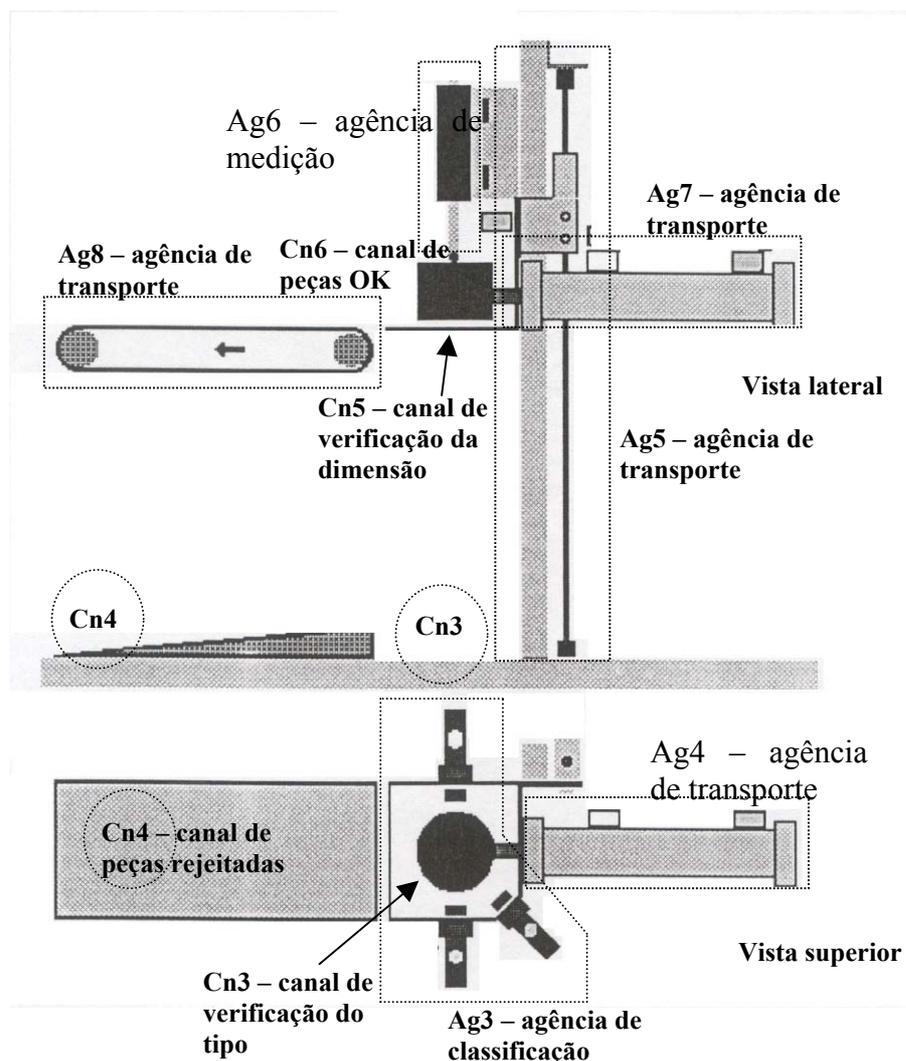


Figura 6.17 – Princípios de solução para as agências Ag3 (sensores indutivo, capacitivo e óptico), Ag4 (atuador pneumático linear), Ag5 (atuador pneumático linear sem haste), Ag6 (sensor analógico de deslocamento), Ag7 (atuador pneumático linear) e Ag8 (esteira acionada por motor elétrico).

A figura 6.18 mostra a terceira parte da estrutura funcional, englobando as atividades de furação e teste do furo. As agências de transporte que na estrutura estão marcadas como equivalentes (sombreadas na figura 6.12), são implementadas através de uma mesa giratória de quatro posições (correspondentes aos quatro canais). Optou-se por uma agência ativa de teste do furo, onde um comando é dado à eletro-válvula pneumática de forma que o atuador linear avance e por sua vez a haste verifique a presença ou não do furo. Dessa maneira, a agência Ag6 (figura 6.17) é condensada a agência anterior Ag5 (figura 6.17) de forma que a realização da medição será evitada através da desabilitação do evento  $\alpha_5$ .

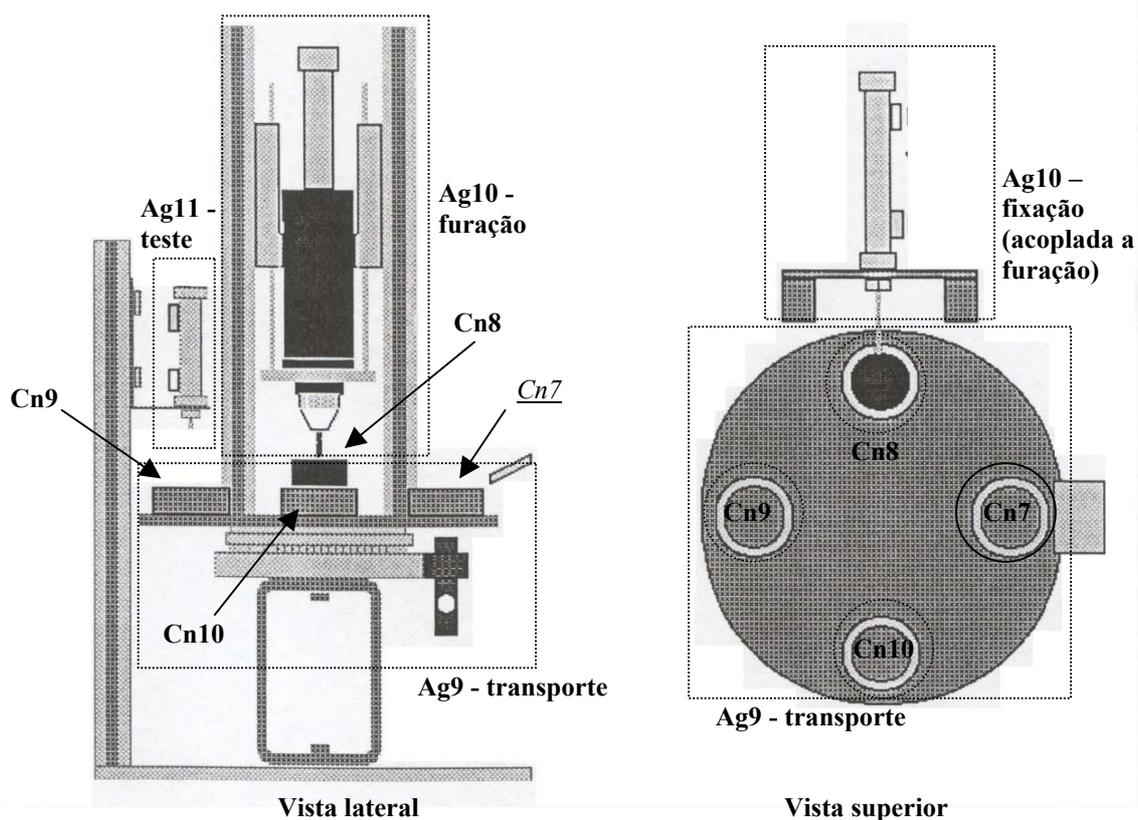


Figura 6.18 – Princípios de solução para as agências Ag9 (mesa giratória acionada por motor elétrico), Ag10 (furadeira acionada por motor pneumático com avanço através de atuador pneumático linear) e Ag11 (atuador pneumático linear com haste de contato para verificação de furo).

A figura 6.19 mostra a terceira parte da estrutura funcional, que engloba as atividades de transporte e depósito das peças de acordo com o tipo do produto. A solução para estas duas agências é um mecanismo de manipulação tridimensional, composto de um atuador pneumático linear com ventosa (vácuo) e dois posicionadores elétricos de fuso. Pela configuração do dispositivo, pode-se considerá-lo como um único, sendo necessário posteriormente condensar as duas agências de transporte numa única agência, refletindo de forma mais adequada a solução proposta.

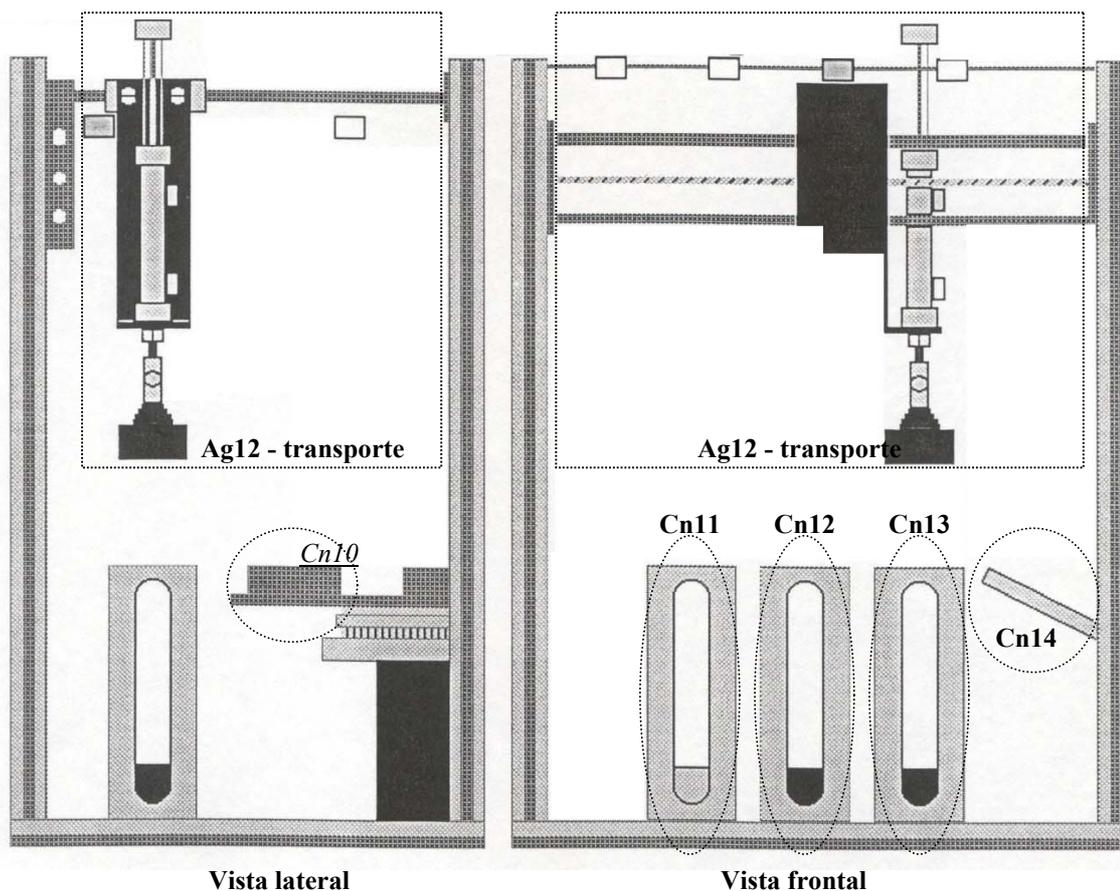


Figura 6.19 – Princípios de solução para a agência Ag12 (manipulador de três eixos).

A partir dos desenhos apresentados nas figuras 6.16 a 6.19 e de acordo com as observações e as determinações dos comportamentos necessários dos diversos atuadores que pertencem a cada uma das agências do sistema em projeto é possível a construção da seqüência operacional de cada uma delas. A rede C/A, com suas características, torna esta atividade mais sistemática, uma vez que os diversos dispositivos (atuadores) têm suas fronteiras bem definidas dentro do sistema. Em outras palavras, é tarefa relativamente simples a identificação dos atuadores que compõem determinada agência observando um sistema físico e sua respectiva estrutura funcional em rede C/A.

Importante ressaltar também que, mesmo alcançando um conjunto de soluções, estas ainda não estão detalhadas a ponto de também se conseguir um detalhamento das seqüências operacionais. Por exemplo, até aqui, ainda não está definido o sensoriamento, os tipos de eletro-válvulas utilizados, o tipo de sinal, dentre outros. O que se tem até o momento são desenhos esquemáticos dos atuadores (configuração espacial ou de montagem sem preocupação com escalas), sem definições quanto a dimensão dos atuadores, quantidade de sensores, materiais, etc. Dessa forma, a seqüência operacional deve exprimir um ordenamento não detalhado do movimento dos atuadores para que estes alcancem o objetivo estabelecido, deixando os detalhes citados para as fases posteriores do projeto (preliminar e detalhado).

Considerando o conjunto de soluções para as agências Ag1 e Ag2 mostrado na figura 6.16, pode-se construir a seqüência operacional de cada uma delas. Pode-se observar que no desenho não estão mostrados (ainda não foram determinados) os sensores de detecção de fins de curso dos atuadores ou de peças e/ou partes. A figura 6.20 apresenta uma concepção inicial da seqüência de movimentação (diagrama funcional segundo IEC 848) dos atuadores de cada uma das agências.

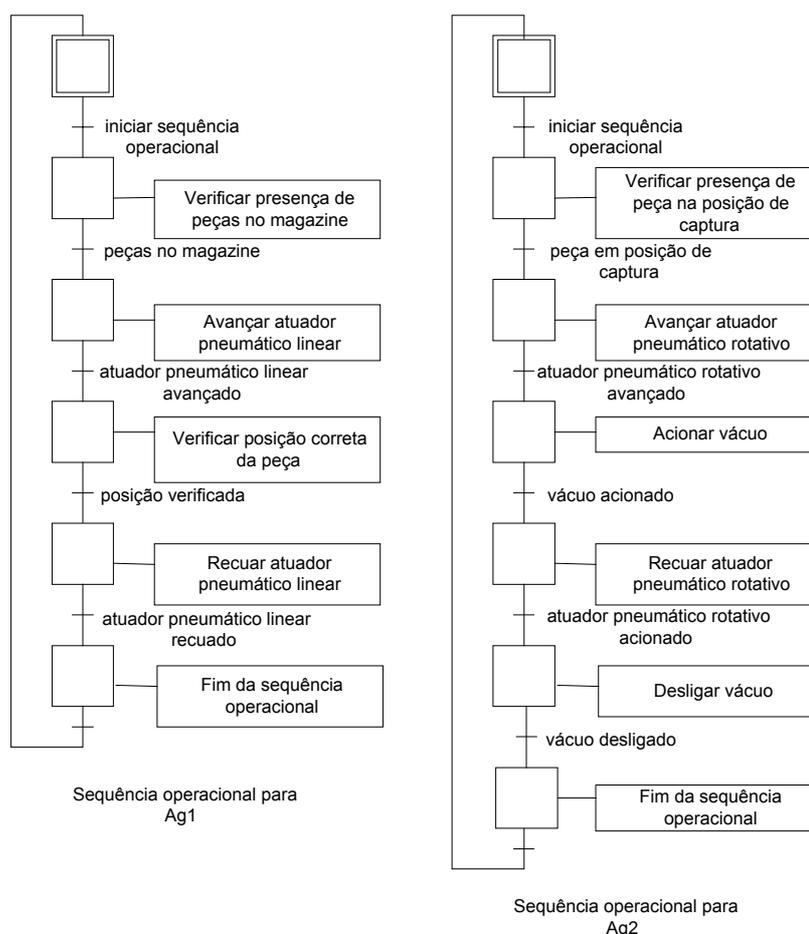


Figura 6.20 – Seqüências operacionais das agências Ag1 e Ag2 mostradas na figura 6.16.

### 6.7 Revisão da estrutura funcional e acoplamento das seqüências operacionais

Conforme discutido no capítulo 4, após a seleção dos princípios de solução e da configuração de montagem destes, muitas vezes o projetista deverá reavaliar a estrutura funcional de forma a adequá-la à montagem selecionada. Esta adequação na rede C/A se dá em função de diversas decisões de projeto, e é necessária para a seleção correta das especificações operacionais, de acordo com aquelas apresentadas no capítulo 3.

No presente estudo de caso, observou-se na etapa anterior que alguns princípios de solução foram selecionados sem a representação adequada na estrutura funcional. Reportando-se novamente a figura 6.12 e comparando-a com as figuras 6.16 a 6.19, são identificadas as seguintes variações:

- A classificação de peças (Ag3) e a medição dimensional (Ag6) são implementadas através de agências ativas, o que acarreta numa modificação da estrutura funcional e conseqüentemente nas especificações operacionais associadas (conforme discutido no capítulo 5);

- O transporte das peças ou partes do canal 10 até os canais 11, 12, 13 e 14 é realizado através de um único mecanismo (o manipulador de três eixos), que corresponde à agência Ag12. Pode-se refinar esta agência em até três novas agências (correspondendo cada uma a um dos três eixos – x, y e z), acarretando em um novo grupo de especificações.

Após a revisão estrutural, faz-se o acoplamento das seqüências operacionais na estrutura de controle obtida nas etapas anteriores. A partir dos princípios de soluções para cada agência e da identificação das seqüências de funcionamento dos atuadores, o projetista pode elaborar o diagrama funcional que representa o modelo de concepção das seqüências operacionais. No presente estudo de caso, o modelo em diagrama funcional (IEC 848) referente ao funcionamento dos atuadores que compõem a agência Ag1 (figura 6.16) é novamente apresentado na figura 6.21, onde se pode observar o acoplamento do sistema produto (modelo da agência). O sistema produto está ainda acoplado ao(s) supervisor(es), formando a estrutura de controle obtida até a presente etapa de projeto.

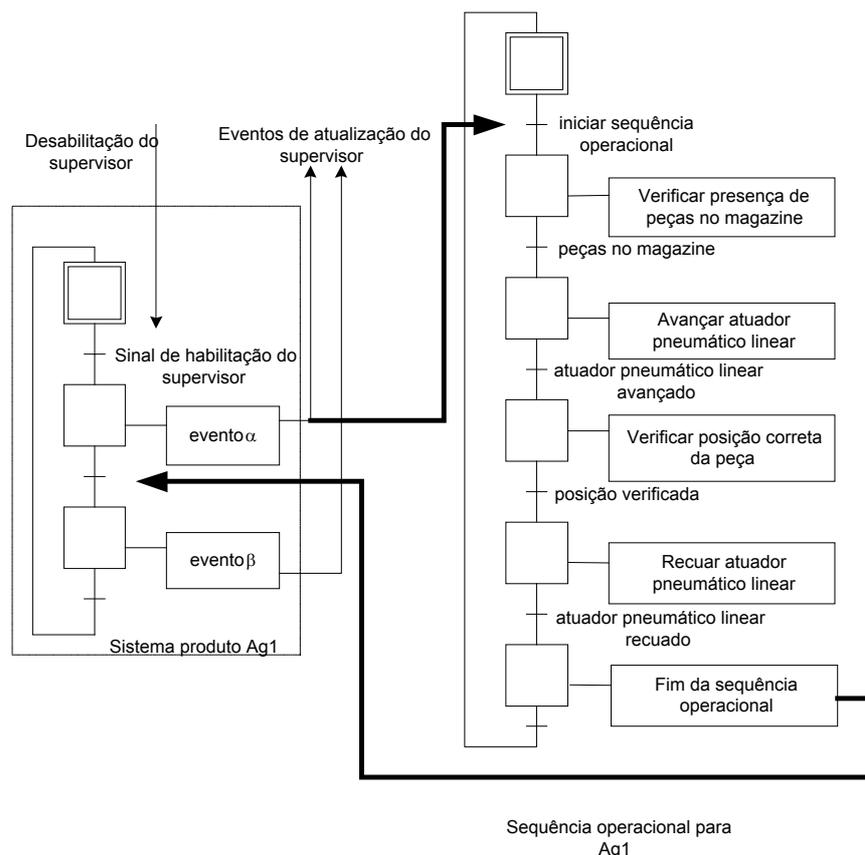


Figura 6.21 – Acoplamento da seqüência operacional Ag1 ao correspondente sistema produto Ag1.

## 6.8 Conclusão

O presente capítulo apresenta um exemplo de aplicação prática da metodologia de projeto conceitual proposta. Os resultados obtidos com o exemplo indicam que a sistemática adotada mostra-se satisfatória na concepção de SMMA, alcançando os objetivos principais do presente trabalho. Desta forma, o resultado desta etapa de projeto aqui apresentada engloba duas concepções: a física e a de controle. O modelo de concepção física está de acordo com a definição de HUBKA (1985), onde tal modelo não contém referências a dimensões, materiais ou mesmo formas. O modelo de HUBKA (1985) expressa tão somente os aspectos físicos e técnicos que são essenciais ao funcionamento das agências e do sistema global.

Por outro lado, o modelo funcional aqui utilizado, por apresentar também uma perspectiva estrutural, define os arranjos físicos entre as diversas agências através dos canais de interligação destas. Estes canais estabelecem previamente qual tipo de arranjo espacial se dará entre agências adjacentes, acarretando assim a perda gradual da abstração dos modelos ainda nas fases iniciais de decomposição funcional.

Por sua vez, estas características trazidas pela rede C/A possibilitam a utilização de outros modelos (linguagens e autômatos) que representam o comportamento livre e o desejado para as agências do sistema em projeto. Une-se desta forma uma ferramenta de projeto físico com uma ferramenta de modelagem e síntese de sistemas de controle para aqueles sistemas físicos tratados no presente trabalho. Então, pode-se variar a estrutura funcional sem aumentar a complexidade de modelagem, visto que as especificações operacionais estão associadas as possíveis configurações desta classe de sistemas.

Finalmente, tem-se uma estrutura de controle formada por três níveis: sistema produto (modelo das agências), supervisores e seqüências operacionais. Conforme visto no capítulo 3, as duas primeiras camadas são implementadas através de variáveis internas do CLP (não trocam sinais com o meio externo), enquanto a terceira representa a interface com o mundo externo (entradas e saídas do CLP). De qualquer forma, estas camadas estão estruturadas numa forma de concepção, que serão detalhadas de acordo com a linguagem de programação utilizada e de acordo com o fabricante do CLP.

O resultado final do projeto do SMMA tratado no presente capítulo pode ser descrito através de duas concepções: a primeira relacionada à estrutura física, através de um conjunto de princípios de soluções que segue a descrição funcional proposta (canais interligando as agências e especificações operacionais aplicadas a estes); a segunda relacionada ao sistema de controle, com as três camadas citadas anteriormente e discutidas no capítulo 3. Obtém-se desta forma duas estruturas durante a mesma etapa de projeto, alcançando assim os objetivos esperados para o presente trabalho.

## 7. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado nesta tese, desenvolvido de forma integrada no Laboratório de Controle e Microinformática e no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos da Universidade Federal de Santa Catarina, surgiu do reconhecimento da inexistência de um conhecimento claro a respeito do projeto de Sistemas de Manipulação e Montagem Automatizados (SMMA). O que se tinha até então eram metodologias e ferramentas para tratar o projeto físico e de controle de forma segmentada. Entretanto, o conhecimento de métodos que otimizassem o processo de projeto de modo a torná-lo integrado foi visto como condição necessária para o aumento da sua qualidade e do seu grau de competitividade.

Dessa forma, o processo de projeto conceitual proposto e apresentado estabelece uma forma organizada e produtiva de combinar os desenvolvimentos em temas como projeto de máquinas, projeto de controladores, modelagem funcional e linguagem de programação, de forma a obter uma abordagem integrada conferindo economia de tempo e recursos. Ainda, consegue-se estabelecer uma metodologia adequada para SMMA, inserindo conceitos e necessidades próprias. Objetiva-se com esta abordagem reduzir o tempo nas fases de projeto dentro do ciclo de vida do sistema e simultaneamente aumentar a confiabilidade do sistema projetado, acarretando uma diminuição do esforço de implementação, integração, testes e manutenção. Nesse sentido, ferramentas formais de análise e síntese são inseridas no processo de projeto, atendendo à nova proposta de descrição funcional do presente trabalho.

Recapitulando brevemente a distribuição de conteúdos ao longo da tese, o capítulo 2 tratou do processo de projeto conceitual de sistemas técnicos enfatizando a atividade de descrição funcional. Inicialmente detectou-se a convergência dos diversos modelos de processo de projeto existentes para o que se denominou modelo consensual, que compreende as fases de: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Mesmo existindo um modelo consensual, observou-se que a descrição funcional, atividade essencial do projeto conceitual, é caracterizada pela utilização de diferentes modelos de representação de acordo com a área de aplicação. Nesse contexto, o capítulo tratou de explorar os principais modelos de descrição funcional, realizando uma análise crítica destes em relação ao poder de modelagem e as restrições de uso. Dentre os diversos modelos utilizados, chegou-se à conclusão de que a rede C/A era a mais adequada para a utilização no projeto conceitual de SMMA.

Basicamente, através da análise de diferentes modelos, verificou-se como condição essencial para uma abordagem de projeto integrada, a representação do sistema em projeto sob o ponto de vista funcional, estrutural e comportamental. A rede C/A, pelas suas características, descreve de forma satisfatória o sistema sob a perspectiva funcional e estrutural, restando a perspectiva comportamental ser tratada através de outra abordagem (tema do terceiro capítulo). Outro ponto

importante do capítulo 2 foi o estudo da abordagem funcional proposta por CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996). De maneira geral, foi visto que tais autores consideram que a especificação de uma função é realizada através dos efeitos criados no mundo externo, ou nas ‘portas’ da função (CHANDRASEKARAN, 1994).

O capítulo 3 apresentou a teoria de controle supervísório baseado na modelagem por linguagens controláveis. Este capítulo teve como objetivo fundamental a incorporação de uma ferramenta de projeto de controladores para os sistemas tratados e, dessa maneira, inserí-la como modelo comportamental à descrição funcional proposta. Assim, a descrição funcional proposta alcança as três perspectivas de representação – funcional, estrutural e comportamental – sendo que as duas primeiras são realizadas através da rede C/A. Dentre os diversos modelos que tratam da modelagem e controle de SEDs (classe dos sistemas tratados), optou-se pelo modelo de RAMADGE e WONHAM (1989) como ferramenta de representação da perspectiva comportamental do sistema em projeto.

O modelo proposto por RAMADGE e WONHAM (1989) é usado para propiciar um processo automático de síntese de supervisores, ao invés dos usuais procedimentos manuais ou heurísticos. Além desta vantagem, o procedimento de síntese de controladores tem a grande conveniência de ser baseado no modelo da dinâmica do sistema em malha aberta e na especificação do comportamento desejado. Assim, novos controladores podem ser rapidamente e automaticamente projetados quando o sistema é modificado ou os objetivos de controle trocados. Além disso, a idéia de síntese do supervisor minimamente restritivo, característica da abordagem de linguagens controláveis, pode atribuir maior grau de liberdade ao sistema controlado.

No presente trabalho, o problema de explosão do número de estados do modelo de RAMADGE e WONHAM (1989) é tratado através da abordagem proposta por QUEIROZ e CURY (2000a) (2000b), que é um refinamento da síntese modular clássica. Dessa forma, os controladores são construídos explorando aspectos de modularidade da planta e das especificações, obtendo-se uma estrutura de controle naturalmente descentralizada em que cada módulo supervisiona apenas os subsistemas diretamente afetados pela respectiva especificação. Em caso de mudanças na planta ou nas especificações, respeitada a condição de não bloqueio, os módulos de controle podem ser reprojados levando em conta apenas informações locais. Consegue-se desta forma um sistema de controle distribuído com maior flexibilidade e maior simplicidade computacional.

O capítulo 4 apresentou a estruturação do projeto conceitual de SMMA de acordo com os fundamentos dos capítulos anteriores. Considerando uma visão de projeto integrada em relação ao sistema físico e de controle, é proposto um processo de projeto onde as atividades são executadas de forma concorrente. Este aspecto é possível em virtude do novo modelo de descrição funcional proposto, este baseado na rede C/A e na modelagem por linguagens controláveis. O capítulo detalha cada atividade do processo de projeto, ressaltando as técnicas mais adequadas de utilização

da rede C/A e como integrar o modelo de autômatos e linguagens controláveis à descrição funcional.

É no capítulo 4 também que é definida a controlabilidade dos eventos de entrada e saída das agências. Mostrou-se que os eventos relacionados à captura de peças ou componentes nos canais de entrada das agências de manipulação e também ao início da atividade de processamento ou montagem são considerados como controláveis. Por sua vez, os eventos relacionados ao depósito de peças ou componentes nos canais de saída das agências de manipulação e ao final da atividade de processamento ou montagem são considerados como não controláveis. Esta hipótese mostrou-se adequada para a representação comportamental das agências.

O capítulo 4 apresentou também a descrição funcional na sua forma completa, ou seja, representando o sistema sob o ponto de vista funcional, estrutural e comportamental. Nesse caso, foi mostrado que a abordagem funcional segundo CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996) permite um tratamento coerente da descrição funcional (baseada na rede C/A) com a teoria de modelagem e controle de SEDs baseada em linguagens controláveis e autômatos.

De maneira geral, o capítulo 4 caracteriza uma proposta de projeto conceitual a ser aplicada no projeto global de SMMA's tornado-o mais rápido e eficiente. Assim, seguindo esta sistemática, o projetista consegue elaborar simultaneamente uma concepção física e de controle para o sistema em projeto. O capítulo deixou em aberto a questão relacionada aos modelos comportamentais das agências e das especificações sobre os canais, em virtude da complexidade do tema. Em função da necessidade de utilização de um modelo comportamental adequado das agências e também de modelos de especificações que evidenciem as restrições impostas à matéria nos canais de forma satisfatória, torna-se necessário explorar quais modelos podem ser empregados na descrição funcional proposta.

Nesse sentido, o capítulo 5 apresentou os modelos propostos de agências e especificações a serem utilizados na descrição funcional do sistema. Inicialmente, é proposta a utilização do modelo em autômato de dois estados para representar as agências do sistema, tornando a modelagem mais simples sob o ponto de vista de representação e de posterior síntese dos controladores. No caso de agências com múltiplos canais de entrada e/ou saída, é proposto que o projetista evolua no processo de refinamento da rede C/A de forma a alcançar agências menos abstratas. Dessa forma, tais agências poderão ser representadas por modelos em autômatos de dois estados, visto que na estrutura refinada as múltiplas entradas e saídas são transferidas para os canais (em função do refinamento das agências). Consegue-se por fim unificar a utilização do referido modelo em autômato, alcançando uma maior simplicidade na descrição funcional.

O ponto principal do capítulo 5, entretanto, é a construção de modelos em autômatos que representem adequadamente as especificações operacionais de SMMAs. Foi visto que, dependendo da configuração do sistema em projeto, diferentes especificações sobre os canais podem ser

associadas à descrição funcional. Assim, o capítulo apresenta um arcabouço de especificações que podem ser aplicadas no projeto integrado de SMMA's, conferindo economia de tempo e caracterizando um grau de automatização de uma das atividades da descrição funcional. As configurações relacionadas ao sistema de manipulação e a interconexão de subsistemas (ou subredes C/A) e suas correspondentes especificações são apresentadas de maneira a fornecer um banco de dados ao projeto conceitual de SMMA's.

O capítulo 5 analisa também especificações relacionadas ao fluxo de informações no sistema (advindo de sistemas de medição) e também analisa a utilização do controle hierárquico para tratar especificações relacionadas ao controle do número de peças presentes no sistema projetado. É recomendado que algumas especificações, especificamente aquelas relacionadas aos sistemas de medição, sejam tratadas de outra forma que não a presente, ou seja, incorporadas a outro nível ou estrutura de controle diferente da considerada.

Por fim, o capítulo 6 apresenta um exemplo que ilustra a aplicação da sistemática de projeto conceitual proposta. Através deste exemplo de projeto, pode-se comprovar a coerência da estrutura de projeto apresentada no quarto capítulo bem como a eficiência da descrição funcional em tratar o problema de projeto de forma integrada. O capítulo apresenta inicialmente o produto a ser manufaturado, onde são identificadas atividades de processamento (usinagem) e montagem como necessárias para a obtenção do produto final desejado. Então, através da utilização da rede C/A como modelo central, o sistema inicialmente abstrato é refinado até o momento em que os modelos comportamentais são inseridos na descrição funcional. Dessa maneira, a concepção física e de controle do sistema de interesse são obtidas de forma naturalmente concorrentes.

## **7.1 Contribuições**

Como contribuição geral deste trabalho pode-se citar uma abordagem inovadora para tratar o problema de projeto dos sistemas aqui tratados. De acordo com a pesquisa, pôde-se inicialmente detectar que o projeto de sistemas automatizados era realizado de forma separada com relação ao sistema físico e de controle. Essa maneira tradicional de projetar acarreta uma perda de eficiência no processo de projeto, gerando perdas de tempo e de recursos. Assim, os fundamentos expostos no trabalho deram suporte à construção de um procedimento de projeto conceitual, que por sua vez abriram caminho para a integração do projeto físico e de controle.

A estruturação do projeto conceitual então concretiza o objetivo primordial do trabalho, uma vez que descreve detalhadamente as atividades e, o que é mais importante, mostra a incorporação da descrição funcional como ferramenta básica de suporte ao projeto simultâneo. De posse do modelo procedural proposto, o projetista pode buscar de forma adequada uma concepção global do sistema projetado, ou seja, concomitantemente uma concepção física e uma concepção de controle.

A nova forma de descrição funcional proposta é outra importante contribuição deste trabalho. De acordo com a análise dos diversos modelos que tratam o assunto, constatou-se como necessidade fundamental a representação do sistema sob o ponto de vista funcional, estrutural e comportamental. Através do estudo criterioso das principais abordagens que utilizam modelos específicos de descrição funcional, pode-se estabelecer as restrições de cada um destes modelos bem como os requisitos a serem alcançados por um novo modelo proposto.

Concluiu-se que a utilização da rede C/A como modelo central de descrição funcional mais a modelagem por linguagens e autômatos permitem a adequada representação do sistema em projeto sob as três perspectivas já citadas. Na verdade, a integração destes modelos resulta numa nova forma de abordagem do projeto conceitual, uma vez que trata a questão comportamental sem ter o sistema físico já projetado ou implementado. Também aqui se pode detectar uma nova proposta de descrição funcional em relação aos modelos estudados.

Importante destacar também como contribuição a utilização de ferramentas formais de modelagem e síntese de controladores de SEDs. No contexto de projeto, vale ressaltar que a confiabilidade do sistema de controle é aumentada, não só pela sistematização do seu desenvolvimento, como também pela incorporação do formalismo lógico proveniente da teoria de controle supervisão, garantindo o cumprimento das especificações estabelecidas. Ademais, esta abordagem permite um tratamento coerente da junção da descrição funcional utilizando a rede C/A, visando a obtenção da perspectiva comportamental.

Aliado a este último aspecto, a utilização da visão de CHANDRASEKARAN (1994) e CHANDRASEKARAN e KAINDL (1996) que consideram a função como os efeitos no mundo externo ou nas portas desta, tornou a junção da rede C/A com a modelagem por linguagens e autômatos outra contribuição deste trabalho. Foi através desta junção que surgiu a abordagem inovadora de descrição funcional aplicável a SMMAs.

Outra importante contribuição deste trabalho diz respeito à construção de um arcabouço de especificações operacionais aplicáveis a SMMAs. Diante da complexidade que envolve a modelagem através de autômatos das especificações desejadas para determinado sistema, este conjunto de modelos proposto insere um certo grau de automação na atividade de projeto. Uma vez que o projetista tem a disposição uma biblioteca de modelos de especificações, de acordo com a configuração do sistema projetado, a descrição funcional do sistema se dá de forma automática acarretando mais eficiência e ganhos de tempo no projeto.

Em síntese, pode-se elencar as contribuições gerais da presente tese como sendo:

- Abordar o problema de projeto de forma integrada, ou seja, contemplando o sistema físico e de controle;
- Estruturar o projeto conceitual de maneira a alcançar uma concepção global;
- Propor um novo modelo de descrição funcional aplicável ao projeto de SMMAs,

- Inserir na atividade de projeto ferramentas formais de modelagem e síntese de controladores;
- Criar um arcabouço de especificações operacionais aplicáveis a SMMA's.

## 7.2 Recomendações

Além de apresentar as contribuições descritas na seção anterior, esta pesquisa deixa em aberto algumas questões que servem de sugestões para trabalhos futuros. Uma primeira questão, não exatamente como uma continuidade do trabalho desenvolvido, mas como complemento deste, é a realização de um estudo sobre diferentes técnicas, métodos e modelos relacionados à descrição funcional de sistemas em projeto para outros domínios de aplicação. Tal trabalho teria como objetivo ampliar o campo de aplicação da metodologia proposta neste trabalho.

Uma outra questão diz respeito às limitações da abordagem de controle modular local. Apesar do modelo apresentado por QUEIROZ e CURY (2000a) (2000b) garantir uma economia computacional, a elevada complexidade do teste de modularidade, aspecto mais custoso da síntese modular, ainda pode ser um obstáculo na solução de problemas de maior porte. É esperado que esse processo venha a ser efetuado de forma ainda mais eficiente tanto ao nível das especificações quanto ao nível da planta.

Um ponto que poderá ser explorado em relação ao aspecto acima citado diz respeito à estrutura similar das agências, das especificações e dos controladores obtidos. Uma vez que as configurações dos SMMA's são caracterizadas por ramos ou linhas com certas especificações e que estas possuem a mesma estrutura, este aspecto poderá ser explorado visando uma verificação mais eficiente da modularidade.

Uma terceira questão a ser abordada é a ampliação do arcabouço de especificações. O quinto capítulo apresentou o conjunto principal de especificações associadas a SMMA's sem no entanto englobar por completo todas as possibilidades de configuração existentes. Para tal fim, é necessário um estudo de sistemas implementados de forma a identificar possibilidades de construção e, dessa forma, construir modelos associados ao correto funcionamento de futuros sistemas projetados.

De maneira geral, a abordagem de projeto conceitual proposta neste trabalho, inovadora no sentido de tratar o problema de concepção física e de controle de forma concomitante, aponta para a construção de uma ferramenta computacional de auxílio ao projeto. Uma vez que se utilizou a rede C/A como modelo central, com regras claras de refinamento e condensação, e aliada a esta um procedimento de modelagem e síntese e ainda uma biblioteca de especificações, é possível pensar numa plataforma computacional que incorpore todos os fundamentos apresentados neste trabalho.

Importante também ressaltar como recomendação a utilização desta nova abordagem no contexto do ensino da engenharia de projeto. Conforme amplamente discutido, uma das causas da

execução do projeto físico e de controle de forma separada justifica-se em parte pelo próprio modelo de ensino das diferentes engenharias. Nesse sentido, é fundamental incorporar ao ensino de engenharia conteúdos que abordem o projeto integrado, como por exemplo o proposto no presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEMANG, D. Using functional models in automatic debugging. **IEEE Expert: Functional reasoning and functional modeling**, vol. 6, 1991.

ANDREASEN, M. M. **The theory of domains**. Internal note, Department of Control and Engineering Design, Technical University of Denmark, 1993.

ASKIN, R. G.; STANDRIDGE, C. R. **Modeling and analysis of manufacturing systems**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

BACK, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Guanabara Dois, 1983.

BACK, N.; FORCELLINI, F. A. **Projeto de produtos**. Apostila do Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 1999.

BOLLMANN, A. **Fundamentos da automação industrial pneumática**. São Paulo, ABHP, 1997.

BONFE, M.; DONATI, C.; FANTUZZI, C. An application of software design methods to manufacturing systems supervision and control. **Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications**, Glasgow, Scotland, UK, 2002.

BRACEWELL, R. H.; WALLACE, K. M. Designing a representation to support function-means based synthesis of mechanical design solutions. **International Conference on Engineering Design (ICED'01)**. Glasgow, UK, 2001.

BRANDIN, B. A. The real-time supervisory control of an experimental manufacturing cell. **In: IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 12, n. 1, 1996.

BUUR, J. **A theoretical approach to mechatronics design**. Denmark: Institute for Engineering Design, 1990.

CARROL, J.; LONG, D. **Theory of finite automata**. Prentice-Hall International Editions, 1989.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems**. Kluwer Academic Publishers, 1999.

CHANDRASEKARAN, B. Functional representation and causal processes. **Advances in computers**, v.38, 1994.

CHANDRASEKARAN, B.; JOSEPHSON, J. R. Representing function as effect. **In: AAI'96 Workshop on Modeling and Reasoning about Function**, Portland. 11p, 1996a.

\_\_\_\_\_. An explication of function. **In: AAI'96 Workshop on Modeling and Reasoning about Function**, 1996b.

CHANDRASEKARAN, B.; KAINDT, H. Representing functional requirements and User-System Interactions. **In: AAI'96 Workshop on Modeling and Reasoning about Function**, Portland, 1996.

CHEN, Y. -L.; LAFORTUNE, S.; LIN, F. Modular supervisory control with priorities for discrete event systems. **In: Proceedings of the 34<sup>th</sup> Conference on Decision and Control**, p. 409-415, December 1995.

CURY, J. E. R. **Controle supervísório de sistemas a eventos discretos**. Apostila do curso de sistemas a eventos discretos. V SBAI, Canela-RS, 2001.

da CUNHA, A. E. C.; CURY, J. E. R. Hierarchically Consistent Controlled Discrete Event Systems. **Proceedings of the IFAC World Congress**, julho 2002.

da CUNHA, A. E. C.; CURY, J. E. R.; KROGH, B. H. An Assume-Guarantee Reasoning for Hierarchical Coordination of Discrete Event Systems. **Proceedings of the Workshop on Discrete Event Systems (WODES)**, outubro 2002.

DE NEGRI, V. J. **Estruturação da modelagem de sistemas automáticos e sua aplicação a um banco de testes para sistemas hidráulicos**. Florianópolis, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

DE NEGRI, V. J.; PAES, F. H. S. Sistematização do projeto de automação de sistemas mecatrônicos com aplicação às pequenas centrais hidroelétricas. **III Seminário Nacional de Controle e Automação**, 2003.

DE NEGRI, V. J. **Sistemas automáticos: conceitos, modelos e projeto**. Apostila do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. 1997.

DUFFY, A. H. B.; ANDREASEN, M. M.; et al. Design co-ordination for concurrent engineering. **International Journal of Engineering Design**, [s.l.]: [s.n.], v.4, n.4, pp. 1-15, Dec. 1993.

EYZELL, J. M.; CURY, J. E. R. Exploiting Symmetry in the Synthesis of Supervisors for Discrete Event Systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, vol.46, 9, pp. 1500-1505, set. 2001.

FONSECA, A. J. H. **Desenvolvimento de uma sistemática para a obtenção das especificações de projetos de produtos industriais**. Florianópolis, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

FERREIRA, M. G. G. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

FESTO. **Handling pneumatics: 99 examples of pneumatic applications**. Festo AG & Co, 2000a.

\_\_\_\_\_. **Mechatronics: training material**. Festo Didactic GnbH & Co., 2000b.

FIOD, M. **Desenvolvimento de sistema computacional para auxiliar a concepção de produtos industriais**. Florianópolis, 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

FRENCH, M. J. **Conceptual design for engineers**. 2 ed. London: Design Council, 1985.

GROOVER, M. P. **Automation, production systems and computer integrated manufacturing**. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

HANISCH, H. –M. **Petri-Netze in the Verfahrenstechnik**. Oldenburg, Munchen, 1992.

HEUSER, C. A. **Modelagem conceitual de sistemas**. In: V EBAI, 1990.

HILDRE, H. P.; et al. **Mekatronikk metodikk**. NTNU, Trondheim, 1996.

HOLLOWAY, L. E.; KROGH, B. H.; GIUA, A. **A survey of Petri nets methods for controlled discrete event systems**. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 7, pp. 151-190. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.

HOPCROFT, J. E.; ULLMAN, J. D. **Introduction to automata theory, languages and computation**. Addison-Wesley USA, 1979.

HUBKA, V.; EDER, W. E. Functions revisited. **International Conference on Engineering Design (ICED'01)**, Glasgow, UK, 2001.

\_\_\_\_\_. **Theory of technical systems**. Springer-Verlag, Germany, 1988.

HUBKA, V. **WDK – Principles of engineering design**. Tradução por W. E. Eder. Heurista, Zurich, 1980. Original em alemão.

International Elektrotechnical Commission., **Preparation of function charts for control systems**, IEC 848. Switzerland, 1988.

ISERMAN, R. Modeling and design methodology for mechatronic systems. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v.1, n.1, Mar. 1996.

JENSEN, K. A high level language for system design and analysis. In: JENSEN, J. and ROZENBERG, G. (Eds). **High-level Petri nets: theory and applications**. Berlin: Springer-Verlag, 1991.

KEUNEKE, A. M. Device representation: the significance of functional knowledge. **IEEE Expert**, pp.22-25, 1991.

KOLLER, R. **Konstruktionslehre für den maschinenbau**. 2 ed. Springer-Verlag, Berlin, 1985.

KRUMHAUER, P. **Rechnerunterstützung für die konzeptphase der konstruktion**. Dissertação – Technische Universität Berlin, Berlin, 1974.

KUMAR, R.; GARG, V. **Modeling and control of logical discrete event systems**. Kluwer Academic Publishers, 1995.

MAFFIN, D. Engineering design models: context, theory and practice. **Journal of Engineering Design**, v.9, n.4, 1998.

MENDES, L. A. **Desenvolvimento e validação de um reator piloto para processamento de materiais por plasma**. Florianópolis, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

MIYAGI, P. E. **Controle Programável**. Edgard Blucher Ltda, 1996.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de automação industrial**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (LTC), 2001.

MURATA, T. Petri nest: properties, analysis and applications. **Proceedings of the IEEE**, 77(4):541-580, 1989.

OGLIARI, A. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plásticos injetados**. Florianópolis, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design – a systematic approach**. Springer-Verlag, UK, 1989.

PEGAH, M.; STICKLEN, J.; BOND, W. Functional representation and reasoning about the F/A-18 aircraft fuel system. **IEEE Expert: Functional reasoning and functional modeling**, vol. 4, 1993

PUGH, S. **Total design**. Addison-Wesley, Massachussets, 1991.

PULM, U.; LINDEMANN, U. Enhanced systematics for functional product structuring. **International Conference on Engineering Design (ICED'01)**, Glasgow, UK, 2001.

QUEIROZ, M. H. **Controle modular de sistemas de grande porte**. Florianópolis, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

QUEIROZ, M. H.; CURY, J. E.R. Modular control of composed systems. **Proc. Of the American Control Conference**. Chicago, USA, 2000a.

\_\_\_\_\_. **Modular supervisory control of large scale discrete-event systems.** In: Discrete event systems: analysis and control. Kluwer Academic Publishers, pp. 103-110, 2000. (Proc. WODES 2000, Ghent, Belgium), 2000b.

\_\_\_\_\_. **Synthesis and implementation of local modular supervisory control for a manufacturing cell.** In: Discrete event systems: analysis and control. Kluwer Academic Publishers, pp., 2002. (Proc. WODES 2002).

QUEIROZ, M. H.; SANTOS, E. A. P.; CURY, J. E. R. Síntese modular do controle supervisório em diagrama escada para uma célula de manufatura. **Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.** Canela - RS, 2001.

RAMADGE, P. J. Some tractable supervisory control problems for discrete event systems modeled by Büchi automata. **In: IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 34, n. 1, p. 10-19, 1989.

RAMADGE, P. J.; WONHAM, W. M. The control of discrete event systems. **Proceeding of the IEEE**, 77 (1): 81-98, Jan. 1989.

REISIG, W. **Petri nets: an introduction.** Springer-Verlag, Berlin, 1985.

RODENACKER, W. G. **Methodisches Konstruieren.** Springer-Verlag, 1991.

ROTH, K. **Konstruieren mit konstruktions-katalogen.** Springer-Verlag, Berlin, 1982.

RUDIE, K.; WONHAM, W. M. Think globally, act locally: decentralized supervisory control. **IEEE Transaction on Automatic Control**, 37(11), 1992.

RUMBAUGH, J.; BOOCH, G.; JACOBSON, I. **The UML Reference Guide.** Addison Wesley Longman, 1999.

SANTOS, E. A. P.; CURY, J. E. R.; DE NEGRI, V. Mechatronic design and supervisory control theory for fluid power applications. **Proceedings of the International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP'01)**, Hangzhou, China, 2001a.

SANTOS, E. A. P.; DE NEGRI, V. J.; CURY, J. E. R. A computational model for supporting conceptual design of automatic systems. **International Conference on Engineering Design (ICED'01)**, Glasgow, UK, 2001b.

SANTOS FILHO, D. J.; SILVA, J. R.; et al. Estruturação da modelagem de processos em sistemas produtivos. **Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. Canela-RS, 2001.

SEMBUGAMOORTHY, V.; CHADRASEKARAN, B. Functional representation of devices and compilation of diagnostic problem-solving systems. In: **Experience, Memory, and Learning**. J. Kolodner and C. Riesbeck (eds.). Lawrence Erlbaum Associates, 1986.

SHAKERI, A. **A methodology for development of mechatronic systems**. Tese de doutorado, Norwegian University of Science and Technology, 1998.

SHIMOMURA, Y.; TAKEDA, H.; YOSHIOKA, M.; et al. Representation of design object based on the functional evolution process model. In: A. C. Ward (ed.): **Proceedings of the 1995 Design Engineering Technical Conferences**, DE-Vol. 83, ASME, New York, USA, 1995.

STTETER, R.; AßMANN, G.; VIERTLBÖCK, M. Functional product modeling – new methods for the generation of product functions. **International Conference on Engineering Design (ICED'01)**. Glasgow, UK, 2001.

SVENDSEN, K. -H.; HANSEN, C. T. Decomposition of mechanical systems and breakdown of specifications. **International Conference on Engineering Design (ICED'93)**, The Hague, 1993.

TORRICO, C. C.; CURY, J. E. R. Hierarchical supervisory control of discrete event systems based on state aggregation. **Proceedings of the IFAC World Congress**, 2002.

ULLMAN, D. G. A new view on function modeling. In: **Proceedings of International Conference on Engineering Design (ICED'93)**, 1993.

\_\_\_\_\_. **The mechanical design process**. McGraw-Hill, New York, 1992.

UMEDA, Y.; MASAKI, I.; YOSHIOKA, M.; et al. Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, Cambridge University Press, vol. 10, 1996.

UMEDA, Y.; TAKEDA, H.; TOMIYAMA, T.; ET AL. **Function, behaviour and structure**. In: Applications of Artificial Intelligence in Engineering. Computational Mechanics Publications and Springer-Verlag, pp. 177-193, 1990.

UMEDA, Y.; TOMIYAMA, T. FBS Modeling: modeling scheme of function for conceptual design. In: **The Working Papers for the Ninth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems**. Department of Social Science Informatics, University of Amsterdam, pp. 271-278, Amsterdam, The Netherlands, May 1995.

\_\_\_\_\_. Functional reasoning in design. **IEEE Expert, intelligent systems & their applications**, vol. 12, n. 2, pp. 42-48, 1997.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **Systematic approach to the design of technical systems and products**, VDI 2221. [s.I.], 1987.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **Konzipieren technischer produkte**, VDI 2222. Düsseldorf, 1973.

VDI 2860 VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. Assembly and handling; Handling functions, handling units; Terminology, definitions and symbols. [s.I.]1990.

WELCH, R. V.; DIXON, J. R. Representing function, behavior and structure during conceptual design. **Design Theory and Methodology**, ASME, v.42, pp. 11-18, 1992.

WONG, K. C.; THISTLE, J. G.; HOANG, H. -H.; et al. Conflict resolution in modular control with application to feature interaction. In: **Proceedings of the 34<sup>th</sup> IEEE Conference On Decision and Control**, p. 416-421, 1995.

WONG, K. C. WONHAM, W. M. Modular control and coordination of discrete-event systems. **Discrete Event Dynamic Systems**, v.8, n.3, p. 241-273, 1998.

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

WONHAM, W. M.; RAMADGE, P. J. Modular supervisory control of discrete event systems. **Mathematicas of control, signals and systems**, v.1, n.1, pp. 13-30, 1988.

ZHANG, W. Y.; TOR, S. B.; BRITTON, G. A. A knowledge-based functional reasoning strategy to the conceptual design of mechanical products. **International Conference on Engineering Design (ICED'01)**, Glasgow, UK, 2001.

ZHONG, H.; WONHAM, W. M. On the consistency of hierarchical supervision in discrete-event systems. **IEEE Transaction on Automatic Control**, vol. 35, n. 10, 1990.

ZILLER, R. M. **A abordagem Ramadge-Wonham no controle de sistemas a eventos discretos: contribuições a teoria**. Florianópolis, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.