

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Aplicação de Sistemas Holônicos  
à Manufatura Inteligente**

Autor: **Gustavo Nucci Franco**  
Orientador: **Antonio Batocchio**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

## **Aplicação de Sistemas Holônicos à Manufatura Inteligente**

Autor: **Gustavo Nucci Franco**

Orientador: **Antonio Batocchio**

Curso: **Engenharia Mecânica**

Área de concentração: **Materiais e Processos de Fabricação**

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003

SP – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F848ac Franco, Gustavo Nucci  
Aplicação de sistemas holônicos à manufatura  
inteligente / Gustavo Nucci Franco --Campinas, SP:  
[s.n.], 2003.

Orientador: Antonio Batocchio.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Sistemas de fabricação integrada por  
computador. 2. Inteligência artificial. 3. Empresas  
virtuais. 4. Planejamento empresarial. I. Batocchio,  
Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

TESE DE DOUTORADO

**Aplicação de Sistemas Holônicos**  
**à Manufatura Inteligente**

Autor: **Gustavo Nucci Franco**

Orientador: **Antonio Batocchio**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Antonio Batocchio, presidente**  
Faculdade de Engenharia Mecânica / UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. João Maurício Rosário**  
Faculdade de Engenharia Mecânica / UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Marcio Fabius Henriques de Carvalho**  
Centro de Pesquisas Renato Archer – CenPRA

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi**  
Escola Politécnica / USP

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto**  
Escola de Engenharia de São Carlos / USP

Campinas, 15 de agosto de 2003

## Dedicatória

... à minha família.

## Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que me incentivaram e ajudaram na realização deste trabalho, sobretudo meus pais, parentes e amigos. Agradeço especialmente ao professor, orientador e amigo Prof. Dr. Antonio Batocchio, a quem devo muito do que aprendi nos últimos sete anos. Agradeço a ajuda que me foi dada pelos professores da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, Prof. Dr. Fernando Gomide e Prof. Dr. Ricardo Gudwin, que me indicaram os caminhos do estado da arte em Inteligência Artificial. Agradeço aos professores e pesquisadores Dr. Steve Newman, Dr. Bob Young, Dr. Sharim Harimifard e Dra. Jenny Harding da The Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering da Loughborough University (Inglaterra) que muito contribuíram para este trabalho e, ainda, aos colegas Roberto Rosso e David Guerra que me acolheram e tanto me ajudaram em minhas necessidades no exterior. Agradeço a todos os professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP que serviram de modelo para este trabalho ou de alguma forma me ajudaram. Agradeço aos colegas e funcionários da UNICAMP que compartilharam comigo o dia a dia da vida acadêmica. Agradeço a Paragon Tecnologia Ltda., representante da ferramenta Arena da Rockwell Automations, por ter tornado parte das simulações realizadas possíveis. Agradeço, por fim, a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que forneceu apoio financeiro às pesquisas realizadas.

A todas essas pessoas, presto minhas sinceras homenagens.

*"Alla macchina, io preferisco il cervello.  
È più economico e non inquina."*

*Gió di Torquá  
(Valdicastello, Pietrasanta, Lucca, Itália)*

## Resumo

FRANCO, Gustavo Nucci. *Aplicação de Sistemas Holônicos à Manufatura Inteligente*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 177 pp. Tese (Doutorado)

A Economia Digital tem pressionado empresas de diversos setores para investirem em novas tecnologias que garantam diferenciais competitivos e, com isso, sua sobrevivência. Diante desse acirrado cenário, surgem os Sistemas Inteligentes de Manufatura e, com esses, modelos de produção inovadores, os quais são capazes de se re-configurarem de forma ágil conforme as mudanças do ambiente onde se inserem. Este trabalho defende que, nesse contexto, inteligência significa unir autonomia, cooperação e organização de maneira eficaz e, de acordo com o sentido adotado, utiliza o paradigma holônico do jornalista húngaro Arthur Koestler para apoiar a busca de novas soluções para o ganho de competitividade das organizações empresariais. Sua principal meta é, assim, contribuir para o desenvolvimento de Sistemas Inteligentes de Manufatura aptos a enfrentarem os desafios da Economia Digital. Para isso, este trabalho apresenta os principais conceitos sobre manufatura inteligente e identifica os fatores de competitividade mais relevantes. Como suas principais contribuições, esta tese levanta a base tecnológica necessária para a implementação desse sistema e desenvolve uma metodologia que apóie seu projeto. Ao seu final, concluiu-se sobre a importância de se investir em Sistemas Inteligentes de Manufatura.

### **Palavras chave**

Sistema de Manufatura, Paradigma Holônico, Inteligência Artificial

## Abstract

FRANCO, Gustavo Nucci. *Application of Holonic Systems to the Intelligent Manufacturing*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 177 pp. Thesis (Doctoral)

The Digital Economy has compelled enterprises in various economic sectors to invest in new technologies that ensure competitive edges and, thus, their chances to survive. This scenario urges to the development of Intelligent Manufacturing Systems, bringing with them innovative models that are able to be re-configured in an agile and autonomous way according to environmental changes. In this context, this thesis argues that intelligence means to join autonomy, cooperation and organization together efficiently. In this sense, it adopts the Arthur Koestler's holonic paradigm to support the search for competitiveness in enterprises. Its main goal is to contribute to the development of Intelligent Manufacturing Systems capable to face challenges in the Digital Economy. Thus, it presents core concepts about intelligent manufacturing and identifies relevant competitive factors. As its main contributions, it finds the necessary technological base out and develops a design methodology. At the end, it reasons about the importance of investing in Intelligent Manufacturing Systems.

### **Keywords**

Manufacturing System, Holonic Paradigm, Artificial Intelligence

# Sumário

## **Capítulo 1 – Introdução 1**

1.1	Padrões competitivos da Economia Digital .....	1
1.2	Formulação do problema.....	3
1.3	Objetivos .....	6
1.4	Uma abordagem através da Postura Intencional .....	7
1.5	Plano geral da tese.....	9

## **Capítulo 2 – Sistemas de Manufatura 13**

2.1	Definições fundamentais .....	13
2.1.1	A função produção	14
	Sistema de manufatura	15
	Sistema de serviço	16
	Planejamento e controle	17
	Planejamento e controle da produção	20
2.1.2	Arquitetura	21
	Arquitetura de sistema	22
	Arquitetura de referência	23
2.1.3	Terminologia complementar	24
2.2	Do vapor à manufatura inteligente.....	25

2.3	Contexto atual das organizações .....	28
2.3.1	Mudança de valores .....	29
2.3.2	Competência tecnológica .....	29
2.4	Os modernos sistemas de manufatura .....	30
2.4.1	Manufatura Ágil .....	31
2.4.2	Empresas Virtuais .....	33
2.4.3	Consórcio Internacional de IMS .....	34
	Test Case 4 – Globeman 21 .....	34
	Test Case 5 – Holonic Manufacturing Systems .....	36
2.4.4	Paradigmas relacionados ao HMS .....	37

## **Capítulo 3 – O Paradigma Holônico 39**

3.1	O que é inteligência? .....	39
3.2	Comportamento social .....	42
3.3	A organização inteligente .....	44
3.3.1	Coordenação em processos de negócio distribuídos .....	45
3.3.2	Estrutura de coordenação .....	47
	Cooperação no processo de planejamento .....	48
	Negociação no processo de tomada de decisão .....	49
3.4	Holons e holarquias .....	49
3.4.1	O efeito Janus .....	52
3.4.2	Dissecabilidade .....	53
3.4.3	Regras fixas e estratégias flexíveis .....	54
3.4.4	Filtros e gatilhos .....	55
3.4.5	Mecanização e liberdade .....	56
3.4.6	Degeneração e regeneração .....	57

3.5	Aplicando o paradigma holônico .....	58
3.5.1	Hierarquização de hábitos e improvisações .....	59
3.5.2	Programação de atividades da produção .....	60

## **Capítulo 4 – Requisitos Tecnológicos 63**

4.1	Inteligência artificial .....	63
4.1.1	Agentes inteligentes .....	64
4.1.2	Sistemas Multiagentes .....	66
	AARIA (Autonomous Architecture at Rock Island Arsenal) .....	69
	Outras aplicações industriais .....	70
4.2	Sistema Holônico de Informação para PME .....	72
4.2.1	PMEs como sistemas casualmente holônicos .....	74
4.2.2	A PME desenvolvida holonicamente .....	75
4.3	Arquitetura de referência de controle PROSA .....	76
4.3.1	Agregação .....	79
4.3.2	Especialização .....	80
4.3.3	Holons de suporte .....	81
4.4	Arquitetura Holobloc .....	82
4.4.1	Kernel Holônico .....	84
4.4.2	Implementação da Arquitetura do HoloBloc .....	85

## **Capítulo 5 – HSDD: a Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos 89**

5.1	Projeto de Sistemas Multiagentes .....	89
5.2	A estrutura HSDD .....	93
5.2.1	Do domínio de consumidor para o domínio funcional .....	95

5.2.2	Agentes holônicos inteligentes	98
5.2.3	Coordenação de sistemas distribuídos	100
5.2.4	Parâmetros organizacionais	101
5.3	Medidas de desempenho de projeto .....	103
5.3.1	A matriz de projeto (DM)	105
5.3.2	Probabilidade de sucesso	106
5.3.3	Avaliação do sistema objeto	106
5.4	Decomposição do sistema objeto.....	107
5.4.1	Capacidade de percepção	108
5.4.2	Capacidade de raciocínio	108
5.4.3	Capacidade de atuação	110
5.4.4	Planejamento distribuído	111
5.4.5	Mecanismos de negociação	112
5.4.6	Estrutura organizacional	113
5.4.7	Modelo de comunicação	115
5.5	Os modos de interação e o HSDD .....	116

## **Capítulo 6 – Infraestrutura Holônica para Sistemas Inteligentes de Manufatura 119**

6.1	Ambiente para Sistema Multiagentes .....	119
6.1.1	Rede de agentes	121
6.1.2	Agentes móveis	124
6.1.3	Implementação do ambiente	127
6.2	Aplicação da estrutura de projeto.....	128
6.2.1	Agente holônico inteligente	129
	Modelo básico de agente	129

Processando holons de pedido	131
Deliberação em agentes holônicos	132
Encapsulamento dos holons	133
6.2.2 Coordenação de sistemas distribuídos	136
Domínios de cooperação	137
Holon de programação	138
Protocolos de negociação	139
6.2.3 Parâmetros organizacionais	141
Estrutura organizacional holônica	141
Comunicação e cooperação	142
6.3 Integração do sistema objeto .....	144
6.3.1 Integração com os sistemas operacionais	145
6.3.2 Integração com os recursos humanos	146
6.3.3 Integração com os sistemas legados	147
6.3.4 Integração com modelos virtuais	148
6.4 Desempenho de projeto do sistema objeto .....	149

## **Capítulo 7 – Conclusões e Comentários Finais 153**

7.1 Conclusões.....	153
7.1.1 A validade da metodologia adotada	155
7.1.2 Preocupações com a realidade brasileira	157
7.2 Trabalhos futuros.....	159
7.3 Comentários finais.....	161

## **Referências Bibliográfica 163**

## Lista de figuras

Figura 1.1: Ford modelo T 1914, o everyman car	2
Figura 2.1: Sistema de manufatura [em Franco, 1998]	15
Figura 2.2: Sistema hierárquico de Administração Estratégica [adaptado de Kotler, 1967]	18
Figura 2.3: Exemplo de sistema de planejamento e controle de manufatura baseado em um MRP de ciclo fechado [adaptado de Vollman et. al, 1990]	21
Figura 2.4: Arquitetura de referência CIM-OSA [Vernadat, 1996]	24
Figura 2.5: A evolução para a agilidade dos sistemas de manufatura [Gould,1997]	32
Figura 2.6: Componentes da arquitetura de referência do projeto Globeman [Vesterager et al., 2002]	35
Figura 3.1: Visão sistêmica da definição de inteligência	42
Figura 3.2: Aspectos da coordenação de sistemas distribuídos	46
Figura 3.3: Estruturas para a coordenação de sistemas distribuídos [adaptado de Cuenca & Ossowski, 1999]	48
Figura 3.4: Exemplo de empresa virtual organizada holonicamente [adaptado de Koestler, 1967]	52
Figura 3.5: Níveis de liberdade e mecanização [adaptado de Franco & Batocchio, 2000]	57

Figura 4.1: Visão sistêmica de agente	65
Figura 4.2: Modularidade e descentralização provendo mutabilidade [Parunak, 1998]	68
Figura 4.3: A arquitetura AARIA [Parunak et al., 1999]	70
Figura 4.4: A arquitetura MetaMorph II [Shen et al., 1998]	72
Figura 4.5: PME casualmente holônica [Toh, 1997]	74
Figura 4.6: Representação holônica de uma PME [Toh, 1997]	75
Figura 4.7: Holons básicos de um HMS e suas relações [Wyns, 1999]	77
Figura 4.8: Agregação de holons de recurso [Wyns, 1999]	79
Figura 4.9: Especialização de holons de recurso [Wyns, 1999]	80
Figura 4.10: Um programador centralizado como holon de suporte [Wyns, 1999]	81
Figura 4.11: Estrutura do Sistema de Controle Inteligente [Fletcher et al., 2000]	83
Figura 4.12: Estrutura do Kernel Holônico [Fletcher et al., 2000]	85
Figura 4.13: Arquitetura em camadas do Controle de Alto Nível (HLC) [Christensen, 2003]	87
Figura 5.1: Níveis de interação no projeto de um Sistema Multiagentes	91
Figura 5.2: Domínios de projeto e seus elementos [Suh, 1990]	94
Figura 5.3: Processo de obtenção dos níveis mais elevados do HSDD	97
Figura 5.4: Estrutura básica do HSDD	104
Figura 5.5: Decomposição da capacidade de percepção	108
Figura 5.6: Decomposição da capacidade de raciocínio	109
Figura 5.7: Decomposição da capacidade de atuação	110
Figura 5.8: Decomposição do planejamento distribuído	111

Figura 5.9: Decomposição dos mecanismos de negociação	112
Figura 5.10: Decomposição da estrutura organizacional	114
Figura 5.11: Decomposição do modelo de comunicação	115
Figura 6.1: O conceito de lugar e a classificação de portas [Guerrero et al., 1999]	122
Figura 6.2: Servidor <i>Aglet</i> [Lange & Oshima, 1998]	125
Figura 6.3: Relação entre <i>aglet</i> e <i>proxy</i> [adaptado de Lange & Oshima, 1998]	125
Figura 6.4: Contexto <i>Aglet</i> [Lange & Oshima, 1998]	126
Figura 6.5: Modelo de aplicação do sistema objeto	127
Figura 6.6: A integração da rede de agentes com o ambiente de agentes móveis	128
Figura 6.7: Modelo básico de agente	130
Figura 6.8: Modelo deliberativo de holon	132
Figura 6.9: Encapsulamento de holon de pedido	133
Figura 6.10: Encapsulamento de holon de recurso	135
Figura 6.11: Encapsulamento de holon de produto	136
Figura 6.12: Implementação de domínios de cooperação	137
Figura 6.13: Exemplo de holon de suporte: o holon programador	139
Figura 6.14: Protocolo de negociação baseado em Rede de Contratos	140
Figura 6.15: Auto-similaridade e recursividade dos holons [Wyns, 1999]	142
Figura 6.16: Serviço de mensagem baseado no <i>Aglet API</i>	143
Figura 6.17: Integração de holon operacional	145
Figura 6.18: Integração com recursos humanos	146
Figura 6.19: Integração com sistemas legados	147

Figura 6.20: Integração com recursos humanos	148
Figura 6.21: Sumário da Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD)	149

## Lista de tabelas

Tabela 4.1: Características de ambientes multiagentes [Huhns & Stephens, 1999]	67
Tabela 4.2: Tecnologias industriais baseadas em Sistemas Multiagentes [adaptado de Parunak, 1998; Shen & Norrie, 1999]	73
Tabela 4.3: Domínios LLC e HLC [Christensen, 2003]	85
Tabela 4.4: Partição das funções HLC [Christensen, 2003]	87
Tabela 5.1: Matriz de projeto para a estrutura básica do HSDD	107
Tabela 6.1: Matriz de projeto para o sistema objeto	150

## Nomenclatura

AARIA – *Autonomous Agents at Rock Island Arsenal*

AML – Meta-linguagem de agentes (*agent meta-language*)

AOL – Linguagem objeto de agentes (*agent object language*)

API – Interface Programação (*Application Programming Interface*)

ATP – Protocolo de Transferência de Agente (*Agent Transfer Protocol*)

BDI – Crenças-desejos-intenções (*believe-desire-intention*)

BP – Processo de negócio (*business process*)

C – Restrição (*constraint*)

CCS – Serviço de Comunicação para Cooperação (*Cooperation Communication Service*)

CD – Domínio de cooperação (*cooperation domain*)

CDI – Interface de Domínio de Cooperação (*Cooperation Domain Interface*)

CIM – Manufatura Integrada por Computador (*Computer Integrated Manufacturing*)

CIM-OSA – Arquitetura de Sistema Aberto para CIM (*CIM Open System Architecture*)

CM – Gerenciamento de Coordenação (*Coordination Management*)

CN – Necessidades do consumidor (*consumer needs*)

CNC – Controle Numérico Computadorizado (*Computer Numeric Control*)

CORBA – *Common Object Request Broker Architecture*

CRM – Gerenciamento das Relações com Clientes (*Customer Relationship Management*)

DAI – Inteligência Artificial Distribuída (*Distributed Artificial Intelligence*)

DBP – Processo de negócio distribuído (*distributed business process*)

DKBI – Interface de Bases de Dados/Conhecimento (*Data/Knowledge Base Interface*)

DM – Matriz de projeto (*design matrix*)

DPS – Solução de Problemas Distribuídos (*Distributed Problem Solving*)

ERP – Planejamento de Recursos da Empresa (*Enterprise Resource Planning*)

EU – União Européia (*European Union*)

FBM – Gerenciamento de Blocos de Função (*Function Block Management*)

FIPA – *Foundation for Intelligent Physical Agents*

FR – Requisito funcional (*functional requirement*)

HE – Holon de empresa

HIN – Rede de Informação Holônica (*Holonic Information Network*)

HISS – Conjunto de Especificações para Informações Holônicas (*Holonic Information Specification Set*)

HK – Kernel holônico (*holonic kernel*)

HLC – Controle de alto nível (*high level control*)

HMS – Sistema Holônico de Manufatura (*Holonic Manufacturing System*)

HR – Holon de recurso

HSDD – Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (*Holonic System Design Deployment*)

HTTP – Protocolo de Transferência de Hipertexto (*Hypertext Transfer Protocol*)

HVE – Holon de Empresa Virtual

I – Quantidade de informação (*information amount*)

IA – Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence*)

IEC – *Internation Electrotechnical Commision*

IMS – Sistema Inteligente de Manufatura (*Intelligent Manufacturing System*)

IP – Protocolo de Internet (*Internet Protocol*)

LLC – Controle de baixo nível (*low level control*)

MAS – Sistema Multiagentes (*Multiagent System*)

MASIF – *Móbile Agent System Interoperability Facility*

MES – Sistema Executivo de Manufatura (*Manufacturing Execution System*)

MLL – Linguagem meta-lógica (*meta-logic language*)

MNL – Linguagem meta-natural (*meta-natural language*)

MPS – Plano Mestre de Produção (*Master Production Scheduling*)

MRP – Planejamento de Recursos de Manufatura (*Manufacturing Resource Planning*)

MTON – *Multi-Threaded Object Network*

NAFTA – Tratado de Livre Comércio da América do Norte (*North American Free Trade Agreement*)

NC – Controle Numérico (*Numeric Control*)

OMG – *Object-Management Group*

OO – Orientação a objeto (*object orientation*)

OOP – Programação Orientada a Objeto (*Object-Oriented Programming*)

p – Probabilidade de sucesso (*success probability*)

PME – Pequenas e médias empresas

PROSA – Arquitetura de Produto-Recurso-Pedido-Suporte (*Product-Resource-Order-Staff-Architecture*)

PV – Variável de processo (*process variable*)

RETSINA – *Reusable Task Structure Based Intelligent Network Agents*

RMI – *Remote Method Invocation*

SCM – Gerenciamento da Cadeia Logística (*Supply Chain Management*)

TCP – Protocolo de Controle de Transmissão (*Transmission Control Protocol*)

TI – Tecnologia de Informação

UML – Linguagem de Modelagem Unificada (*Unified Modelling Language*)

VE – Empresa Virtual (*Virtual Enterprise*)

VERA – Arquitetura de Referência para Empresa Virtual (*Virtual Enterprise Reference Architecture*)

VERAM – Modelo de Arquitetura de Referência para Empresa Virtual (*Virtual Enterprise Reference Architecture Model*)

XML – *Extended Markup Language*

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Padrões competitivos da Economia Digital

A Economia Digital tem mudado rotinas desde o final do século passado [Tapscott, 1996]. Embora uma retração econômica esteja a marcar este começo de século, o futuro é realmente excitante. A revolução da Tecnologia da Informação (TI) está apenas em seu começo e o mundo com uma banda infinita, em referência a um aumento extraordinário que se prevê para as comunicações, sequer pode ser imaginado.

Com a expansão das fronteiras econômicas, e sobretudo com a consolidação das vendas pela Internet, economias de escala em constante crescimento devem ser atendidas. Mas, à medida que diferentes culturas, tecnologias e produtos são amplamente disponibilizados, os consumidores se tornam mais exigentes, fazendo com que esse crescimento se contraponha às economias de escopo que rapidamente se fortalecem: há uma demanda crescente por produtos diferenciados.

A diversificação, atendendo às necessidades de cada consumidor de forma quase que exclusiva, se torna requisito qualificador para os produtos de qualquer empresa e, conforme o mercado evolui, novos conceitos e tecnologias devem ser introduzidos. Para algumas indústrias, isso se reflete na gradual perda de valor da produção em massa. Migrando-se para a *customização* em massa, há uma busca constante por se produzir lotes menores, formados por produtos variados, mas com a mesma ordem de grandeza em volume e custo atingida pelos tradicionais modelos difundidos por Henry Ford e Taiichi Ohno [Gould, 1997].

Mas como será possível alcançar com eficiência tal requisito?

Quando a Ford introduziu em 1914 a linha de produção, um carro poderia ter qualquer cor, desde que essa fosse preta (figura 1.1). A padronização de produtos, ferramentas e processos levou a indústria automobilística do começo do século XX a índices de produtividade nunca antes imaginados. Depois, vieram os japoneses e, com seus conceitos de operadores polivalentes, sistemas *just-in-time* e células de manufatura, deram maior flexibilidade e novos rumos a essa indústria [Womack et al., 1990].

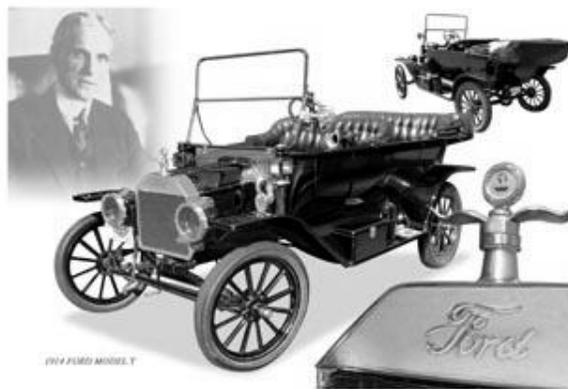


Figura 1.1: Ford modelo T 1914, o *everyman car*

Hoje, pela Internet, um consumidor pode não só escolher a cor, mas também decidir quanto de tecnologia e conforto estarão embarcados em seus automóveis. Através de uma página virtual, uma variedade de acessórios lhe é apresentada e, induzido por seus desejos, esse consumidor avalia as opções e decide sobre suas escolhas. O pagamento é *on-line* e seu pedido pode até gerar automaticamente as ordens de produção que farão com que o produto final lhe seja entregue de acordo com suas especificações.

Deve-se destacar que isso somente é possível porque hoje já existem sistemas de gestão que possibilitam a integração entre indústria e consumidores, e entre aquela e seus fornecedores [O'Brien, 2003]. Mas, segundo o contexto futuro esperado por este trabalho, vislumbra-se algo ainda mais notável: toda cadeia produtiva, desde as matérias-primas básicas até a montagem final de um produto, será não apenas integrada, mas também gerada conforme a disponibilidade de tempo e dinheiro de cada

consumidor. Simples páginas de compra serão no futuro um nó numa grande rede de fornecedores e consumidores, fazendo com que estes possam encontrar e combinar as diversas partes de seu automóvel tal qual músicas que hoje são compartilhadas e carregadas via rede.

Além de definir cada item, suas indicações sobre os custos e os tempos de entrega que sejam mais satisfatórios farão com que toda cadeia tenha que se re-estruturar. Conforme esse consumidor expressa suas vontades em cliques, fornecedores poderão ser inseridos, re-allocados ou até mesmo retirados da cadeia, gerando a configuração mais adequada para garantir a confiabilidade na entrega do produto desejado.

Surge, assim, uma demanda por sistemas de manufatura mais inteligentes, capazes de se re-configurarem de forma ágil conforme as mudanças do ambiente onde se inserem.

Nesse contexto, inteligência significa unir autonomia, cooperação e organização de forma eficaz. Para isso, o homem, com sua adaptabilidade e capacidade criativa, torna-se, por um lado, mais valorizado. Por outro, com o nível de complexidade que esse sistema atingirá, a máquina, com sua capacidade de processamento, faz-se fundamental.

Fica claro, assim, que novos paradigmas, que sigam com rapidez mudanças técnicas e econômicas, devem ser buscados, gerando tecnologias inovadoras. Nesse sentido, este trabalho pretende contribuir com essa constante busca através dos estudos e desenvolvimentos a serem apresentados.

## **1.2 Formulação do problema**

A habilidade de um sistema em se adaptar às alterações em seu ambiente está relacionada à sua capacidade de organização. No entanto, a complexidade que esse sistema pode atingir conduz a uma maior dificuldade na coordenação de suas ações e, assim, determina mudanças em seu comportamento.

A importância da organização e da maneira como essa se estrutura é ponto chave para o estudo e o entendimento de qualquer sistema situado em áreas distintas da ciência, como, por exemplo, na Biologia:

*“Qualquer que seja a natureza das relações que presidem ao princípio da organização, elas é que constituem o problema central da Biologia, e a Biologia só será fecunda no futuro se isso for reconhecido. A hierarquia das relações, desde a estrutura molecular do carbono até o equilíbrio das espécies e os conjuntos ecológicos, será talvez a idéia pioneira do futuro.”*  
[Needham, 1936]

Muitos caminhos já foram adotados na busca de organizações com melhores capacidades competitivas. Desde o começo do século XX, quando Henry Fayol descobriu que a eficiência de uma empresa é função de sua estrutura organizacional, dando origem a Escola Clássica da Administração [Fayol, 1916], muitas descobertas foram feitas. Algumas foram bem sucedidas em suas épocas, servindo de diferenciais competitivos para seus implementadores. Outras, no entanto, falharam, deixando à margem do processo de desenvolvimento empresas que chegaram até a se extinguirem.

É nesse contexto que se apresenta este trabalho, o qual busca, através do estado da arte, novas soluções para o ganho de competitividade das organizações empresariais inseridas na Economia Digital.

E, para o desenvolvimento de uma organização capaz de responder com agilidade às exigências de seu mercado, alguns pontos fundamentais foram adotados como balizadores dos desenvolvimentos a serem apresentados neste trabalho. Assim, as principais hipóteses adotadas por esta tese são:

- Muitos dos sistemas encontrados na natureza apresentam estruturas hierárquicas. Esses consistem de conjuntos de subsistemas em constante interação, cada um dos quais é, por sua vez, formado por outros subsistemas. O Prêmio Nobel em Economia de 1978, Herbert A. Simon, mostra que essa

similaridade não é acidental. Sistemas hierárquicos são capazes de se desenvolverem mais facilmente em processos evolutivos do que sistemas não-hierárquicos [Simon, 1962].

- A divisão de uma sociedade numa variedade de arcabouços hierárquicos não implica, necessariamente, num conjunto de relações burocráticas de patrão-empregado. Uma sociedade complexa pode ser dividida e estruturada em vários tipos de hierarquias (e.g. heterarquias e holarquias) atadas de acordo com suas coesões sociais [Koestler, 1967].
- A habilidade de um sistema em realizar determinadas tarefas é certamente dependente da habilidade das entidades que o compõe. No entanto, alguns sistemas muitas vezes mostram uma inteligência e um conjunto de capacidades distintos da inteligência e das capacidades de suas entidades isoladamente. Existem muitos exemplos nos sistemas encontrados na natureza onde sociedades inteligentes são formadas a partir da organização de indivíduos pouco inteligentes. Assim, quando agentes são agregados em sociedades, pode emergir a inteligência se uma estrutura adequada for construída [Minsky, 1985].
- Um sistema inteligente não deve se desenvolver sobre uma determinada estrutura organizacional. Esse deve ser capaz, sim, de implementar, ajustar, modificar ou substituir essa estrutura sempre que necessário [Van Brussel, 1994].

Este trabalho se refere ao desenvolvimento de sistemas capazes de produzir bens e serviços de acordo com os requisitos competitivos deste começo de século. Embora alguns conceitos aqui utilizados estejam deveras obscuros, suas corretas definições tornarão essas hipóteses melhor entendidas com a evolução deste trabalho. Suas aplicações nos desenvolvimentos a serem apresentados nesta tese serão, ainda, corroboradas por comprovações e ilustrações, sendo, assim, sua validade para este contexto analisada.

### 1.3 Objetivos

Esta tese tem como meta principal a contribuição para o desenvolvimento de Sistemas Inteligentes de Manufatura aptos a enfrentarem os desafios da Economia Digital. Para atingir essa meta, alguns objetivos são focados:

1. Apresentar os conceitos que definem o que é um Sistema Inteligente de Manufatura (IMS), formando uma base de conhecimento que situe o contexto desta tese.
2. Identificar novos fatores de competitividade na Economia Digital, utilizando-os como requisitos funcionais de seus desenvolvimentos.
3. Criar uma base de conhecimento para apoiar o desenvolvimento de um Sistema Inteligente de Manufatura. Enriquecendo essa base, metáforas com sistemas naturais deverão ser amplamente utilizadas como fonte de inspiração.
4. Como se trata de um sistema em fase de pesquisa e desenvolvimento, este trabalho deverá levantar a base tecnológica necessária para a implementação de um Sistema Inteligente de Manufatura. As lacunas tecnológicas existentes deverão ser apontadas, indicando-se o que se pode esperar de inovações para os horizontes de curto e médio prazo.
5. Desenvolver uma metodologia para apoiar o projeto de um Sistema Inteligente de Manufatura que esteja de acordo com o paradigma holônico. Essa metodologia deverá prover a coerência entre os princípios desse paradigma, bem como garantir que os requisitos funcionais levantados para Economia Digital sejam atendidos.
6. Desenvolver um ambiente virtual de análise do sistema desenvolvido com o auxílio de ferramentas computacionais. Através de modelos virtuais, as funcionalidades de um Sistema Inteligente de Manufatura poderão ser aplicadas e testadas.

É importante ressaltar que não é pretensão desta tese o desenvolvimento de um novo sistema de manufatura. Muito menos, não se espera estabelecer uma nova

filosofia que possa ser adotada para se enfrentar todos os problemas da Economia Digital.

## **1.4 Uma abordagem através da Postura Intencional**

Esta tese diz respeito a Sistemas Inteligentes de Manufatura.

No entanto, mesmo deixando as questões filosóficas do que é inteligência para o desenvolvimento deste trabalho em si, uma pergunta fundamental surge: ações como sentir, pensar e agir podem ser atribuídas a sistemas irracionais cujas habilidades estejam abaixo das humanas?

De fato, nenhum grão de areia possui uma mente. Nem tão pouco, os átomos. Mas o que dizer a respeito de moléculas maiores?

Um vírus é uma única e enorme molécula e suas partes atômicas interagem de modo a produzir efeitos bastante surpreendentes. Exemplo dessas habilidades é a auto-replicação de seu código genético, efeito que está muito além da capacidade de qualquer robô existente hoje. Mas isso significa que essas macromoléculas possuem mentes como as dos seres humanos?

Macromoléculas possuem complexidade suficiente para realizarem ações, em vez de permanecerem passivas sofrendo efeitos do ambiente que as rodeia. Mas essas não sabem o que fazem: há razões para as proezas de uma macromolécula, mas essa não está ciente dessas razões.

Seres humanos realizam ações intencionais, enquanto macromoléculas são simplesmente sistemáticas. Mas a verdade é que essas partes impessoais, irracionais, robóticas e destituídas de mente da maquinaria molecular constituem a base fundamental de toda ação [Dennett, 1996]. Prova está no fato de que o próprio ser humano, além de descender diretamente desses, é também formado por esses robôs auto-replicantes.

A possibilidade teórica de um autômato auto-replicante foi comprovada matematicamente por John von Neumann, um dos inventores do computador, cujo brilhante projeto antecipou, ainda na década de 60, muitos detalhes do projeto de

construção do DNA [von Neumann, 1966]. Seus primeiros ensaios utilizavam a teoria de um robô se movendo em um tipo de armazém que guardava todas as peças necessárias para que esse robô pudesse montar uma cópia de si mesmo. Esse robô hipotético possuía funções elementares para se mover e reconhecer suas peças, coletando-as e soldando-as na construção de sua réplica. Em seguida, esse copiava suas instruções, inserindo-as no robô replicado, o qual estava pronto para iniciar as mesmas atividades, criando-se, assim, um processo *ad infinitum*.

Todas essas entidades, desde as moléculas, incluindo não apenas organismos naturais, como vegetais, animais e suas partes, mas também objetos como os robôs, são chamados de Sistemas Intencionais. E para a perspectiva a partir da qual suas ações se tornam visíveis dá-se o nome de Postura Intencional.

Segundo o filósofo e cientista cognitivo Daniel C. Dennett:

*“Postura Intencional é a interpretação do comportamento de uma entidade (pessoa, animal, artefato, qualquer coisa) tratando-a como se fosse um agente racional que governa suas escolhas de ação por uma consideração de suas crenças e desejos.” [Dennett, 1987]*

Trata-se de uma estratégia predicativa onde uma entidade é estudada como um agente racional para prever suas ações ou movimentos. É um método que explora as similaridades para descobrir as diferenças.

Dessa forma, Sistemas Intencionais, por definição, são todas e apenas aquelas entidades cujo comportamento é previsível ou explicável a partir da Postura Intencional. Esses sistemas devem exibir o que se chama de intencionalidade, que, em seu sentido filosófico, significa relacionalidade: alguma coisa exibe intencionalidade se sua competência é, de algum modo, sobre alguma outra coisa.

Ainda, como o objetivo é tratar uma entidade como um agente racional para prever suas ações, supõem-se que essa entidade seja inteligente. E é justamente a suposição de que o agente fará apenas os movimentos inteligentes que cria a vantagem de se fazer predições.

Embora mais arriscada que a Postura de Planejamento e a Postura Física, esta última o método laborioso padrão de inúmeras ciências, a Postura Intencional é menos limitada. Quando se prediz que uma pedra solta no ar cairá no solo, não se atribuem crenças e desejos à pedra; atribuindo-lhe massa, ou peso, e apoiando-se na Lei da Gravidade, predições podem ser feitas. Explicações de por que a água forma bolhas quando ferve, como surgem as cadeias de montanhas e onde a energia do Sol se origina são feitas a partir da Postura Física. Mas, para aplicá-la, deve haver um grande conhecimento do objeto sob análise.

A adoção da Postura Intencional é mais vantajosa principalmente quando a entidade em questão é muito complexa. Cria-se, a partir dessa abordagem, meios para se dizer que um sistema de manufatura é autônomo, cooperativo e inteligente. Desenvolvendo-se uma perspectiva a partir da qual suas ações se tornam visíveis, caminhos para que os mistérios de um objeto em estudo sejam desvendados podem ser abertos.

E é fundamentado pela Postura Intencional que este trabalho ousa dizer que uma estrutura organizacional “sente” seu ambiente ou que uma máquina “imagina” seu estado futuro. Instituído-se essa licença poética, os conceitos e desenvolvimentos a serem descritos podem se tornar mais claros.

## **1.5 Plano geral da tese**

Esta tese está estruturada em sete capítulos, os quais são sumarizados na seqüência.

Neste capítulo 1, os fatores de competitividade na Economia Digital como fatores de motivação para este trabalho foram apresentados. Em seguida, o problema de se construir uma estrutura organizacional capaz de lidar com esses fatores foi formulado. A meta desta tese discretizada nos objetivos almejados foi, então, estabelecida. Por fim, a Postura Intencional foi definida como a abordagem a ser explorada em seus desenvolvimentos.

O capítulo 2 iniciará com a definição dos conceitos básicos a serem adotados. A partir desses, o contexto deste trabalho será mostrado através de um breve histórico da manufatura e como essa se desenvolve de acordo com as necessidades e mudanças

de conjuntura ao longo do tempo. Há nesse capítulo, ainda, uma discussão sobre a passagem por diversas fases (taylorismo, fordismo e ohnismo), destacando-se a importância em suas épocas. Os desafios atuais serão, então, colocados como pontos de partida para a quebra de velhos paradigmas e o desenvolvimento de novos sistemas. Os Sistemas Inteligentes de Manufatura serão, por fim, apresentados como o estado da arte direcionador dos desenvolvimentos que se seguem.

Enquanto um novo paradigma para sistemas de manufatura, os sistemas holônicos serão apresentados no capítulo 3. O processo de transição dos resultados do trabalho desenvolvido por um jornalista para a geração das soluções propostas por esta tese poderá não ser tão evidente para muitos. Sendo assim, os conceitos holônicos serão abordados de maneira aprofundada nesse capítulo. Para fundamentar sua aplicação, outros modelos que descrevam o desenvolvimento de sistemas complexos, estes relacionados a ramos da ciência como a Biologia, a Sociologia e a Psicologia, serão amplamente utilizados, formando uma base metafórica para o melhor entendimento das propostas aqui apresentadas.

Para a implementação de um Sistema Inteligente de Manufatura, diversas tecnologias devem ser utilizadas. Muitas dessas vêm sendo desenvolvidas, já tendo sido mundialmente estudadas e aplicadas nos últimos anos. Desse modo, o capítulo 4 mostrará os resultados das investigações sobre essas tecnologias realizadas nesta tese, indicando como a manufatura inteligente vem sendo buscada por outros grupos de pesquisa. Esses resultados serão fundamentais para o alcance dos objetivos propostos, uma vez que cada um dos sistemas abordados teve sua participação como inspiração ou mesmo base tecnológica deste trabalho.

As condições necessárias para o projeto de um sistema holônico serão tratadas no capítulo 5. Baseando-se nos princípios de um sistema re-configurável, constituído de elementos autônomos e cooperativos, uma metodologia para o projeto de um Sistema Inteligente de Manufatura será, portanto, apresentada. Trata-se da Decomposição de Projeto de Sistemas Holônicos (HSDD – *Holonic System Design Deployment*) e de todo seu processo de desenvolvimento. Através dessa estrutura de projeto, será possível que o paradigma holônico seja focado enquanto cada elemento do sistema de

manufatura esteja sendo projetado. Como resultado, espera-se garantir que um sistema realmente inteligente, que atenda aos princípios estabelecidos pelo paradigma holônico, seja obtido.

Aplicando-se o método desenvolvido para o projeto de um Sistema Inteligente de Manufatura, e utilizando-se as tecnologias disponíveis, o capítulo 6 mostrará o projeto de uma infraestrutura para um sistema holônico. A concepção desse sistema será detalhada através da utilização de rede de agentes [Gudwin, 1996] em conjunto com um ambiente de agentes móveis [Lange & Oshima, 1998], formando, assim, um Sistema Multiagentes bastante flexível.

Fechando este trabalho, no capítulo 7 serão apresentadas as conclusões desta tese. Ainda, esse fará uma análise final sobre o Sistema Inteligente de Manufatura proposto no capítulo anterior e os diferentes paradigmas existentes por trás desse (e.g. a Economia Digital, os sistemas holônicos, os Sistemas Multiagentes). Ainda, os trabalhos futuros que deverão dar continuidade aos desenvolvimentos apresentados nesta tese serão, por fim, descritos.



## Capítulo 2

# Modernos Sistemas de Manufatura

*Para contribuir com o desenvolvimento das futuras organizações inteligentes, este trabalho não negligencia o estado atual no ambiente dos sistemas de manufatura. Nem se esquece do passado que trouxe ao atual nível de sofisticação.*

*Assim, este capítulo apresentará a definição de conceitos essenciais, os quais serão fundamentais para o entendimento do conteúdo desta tese. O conceito de planejamento será localizado dentro da função produção, mostrando seus aspectos em relação aos sistemas de manufatura e serviços. As atividades de planejamento e controle serão, em seguida, definidas como parte de um ambiente estratégico superior. Então, os conceitos que embasam o desenvolvimento de arquiteturas apropriadas para Sistemas Inteligentes de Manufatura serão mostrados.*

*Além de seu papel semântico, será mostrado, ainda, como esses conceitos têm evoluído no tempo e qual é a dinâmica do ambiente onde os modernos sistemas de manufatura estão inseridos.*

*Como base deste texto, estão os resultados da pesquisa bibliográfica realizada como parte importante da metodologia aplicada neste trabalho.*

### **2.1 Definições fundamentais**

A literatura científica é, e sempre será, repleta de interpretações particulares que levam a significados específicos para um mesmo objeto. Conforme defendido por muitos existencialistas, como Simone de Beauvoir, cada indivíduo pode dar à sua liberdade um conteúdo concreto próprio [de Beauvoir, 1948]: “[...] a liberdade toma um passo positivo e construtivo, o qual faz com que a essência proceda à existência [...]. Ciência, técnica, arte e filosofia são conquistas da existência sobre a essência; [...] é na luz dessa hipótese que a palavra progresso encontra seu significado verídico.”

Ambigüidades podem ser, assim, geradas, levando, algumas vezes, a obscuridade e falta de distinção. Mas, tal qual na arte, a liberdade de interpretação é um

dos pontos essenciais para a garantia do contínuo desenvolvimento do pensamento científico. E, diante desse cenário inevitável, o fundamental é se fazer entender. Ainda, é importante se localizar o contexto onde os conceitos abordados são aplicados.

Enquanto foco a ser mantido neste trabalho, o problema de coordenação em sistemas distribuídos será tratado no próximo capítulo. Mas, com a intenção de criar uma base de conhecimento fundamental para as discussões futuras, a definição de planejamento da produção e sua localização dentro da função produção podem ser encontradas nas seções seguintes.

### *2.1.1 A função produção*

De maneira simples, a palavra produção pode ser descrita como o processo de se produzir alguma coisa. Mas existe algo em sua essência que a faz merecer um requinte maior em sua definição: seu processo de agregação de valor.

A função produção é central para uma organização, pois é nessa que produtos, resultados de seu trabalho, são gerados. Entende-se, aqui, que um produto é algo a ser oferecido para satisfazer a uma necessidade ou desejo, podendo consistir de um bem físico, um serviço ou mesmo uma idéia [Kotler, 1967; Juran, 1980].

Produzir significa adotar processos, os quais usualmente envolvem seqüências de passos. À medida que cada passo é dado, valor é adicionado, chegando-se, no final, a um produto com certo valor agregado. Mas como saber se esse produto irá gerar riqueza, o real sentido para a existência da empresa que o fabrica?

Um mercado é formado por consumidores potenciais que compartilham necessidades ou desejos específicos. Estando habilitados para fazer uma troca que satisfaça essa necessidade ou desejo, esses buscam algo que atenda a suas expectativas. Para isso, optam por produtos que proporcionem o maior valor pelo dinheiro desembolsado.

É com foco nesse contexto que a função produção deve exercer suas atividades: o valor agregado a cada produto gerado é, então, uma estimativa da satisfação de seu consumidor.

## Sistema de manufatura

A função manufatura é o processo de produção de bens físicos. Segundo Antonio Batocchio e Oswaldo L. Agostinho:

*“Manufatura é a transformação de matéria-prima, em seus diversos estados, em produtos finais, para serem disponibilizados para o consumidor final. Os produtos são gerados por uma combinação de trabalho manual, máquinas, ferramentas especiais e energia, sendo, então, disponibilizados para o consumidor final.” [em Franco, 1998]*

A visão sistêmica [Bertalanffy, 1968] da manufatura remete a quebra desse modelo cartesiano através de uma modelagem baseada em idealizações que facilitam seu estudo. As relações essenciais existentes na manufatura podem ser, assim, melhor explicadas. A partir da definição da manufatura como sistema, essa pode ser entendida como a composição das funções básicas mostradas na figura 2.1.

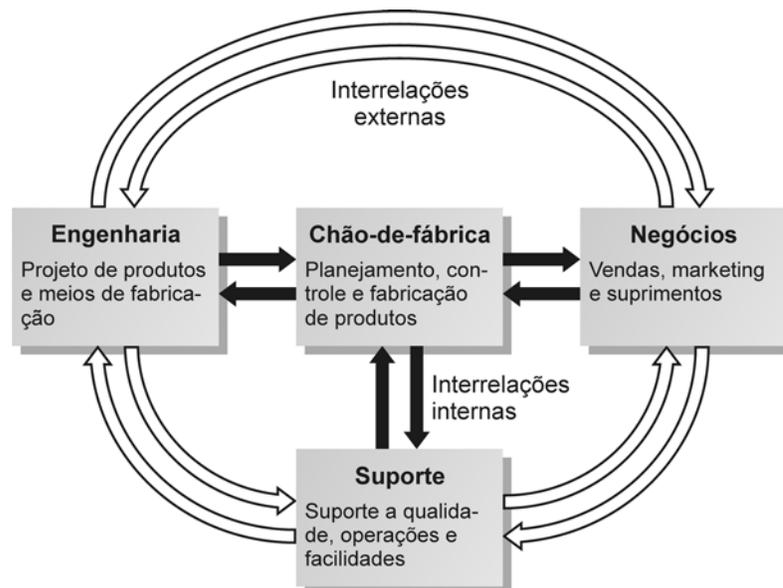


Figura 2.1: Sistema de manufatura [em Franco, 1998]

Conforme pode ser visto, um sistema de manufatura integra diferentes atividades, podendo ser composto, segundo Batocchio, por funções básicas de [em Franco, 1998]:

Engenharia: é responsável pelo projeto dos produtos, desde sua concepção juntamente com o *marketing*, até sua aprovação final. Além disso, a função Engenharia deve prover os meios de fabricação, atividade que engloba desde a especificação e o projeto dos recursos necessários, passando pela definição dos roteiros de fabricação, indo até a comunicação com o chão de fábrica.

Chão-de-fábrica: é responsável pela fabricação dos produtos nas quantidades determinadas. A função chão-de-fábrica utiliza, para isso, diversos recursos como máquinas, equipamentos e mão-de-obra. Estão também incluídas no chão de fábrica as atividades de planejamento e controle da produção.

Negócios: engloba as áreas de vendas, *marketing* e suprimentos. A ordem de se produzir normalmente se origina das vendas e do trabalho de *marketing*, através de um pedido do cliente ou uma previsão de mercado. A área de suprimentos faz a conexão entre o sistema de manufatura e o mercado fornecedor, sendo afetada pelas atividades de vendas, *marketing* e engenharia.

Suporte: é responsável por manter sob controle as atividades de chão de fábrica, visando tanto o desempenho operacional dos equipamentos como a qualidade de seus produtos. A função suporte é composta pelo suporte à qualidade (e.g. controle de qualidade), suporte às operações (e.g. manutenção de máquinas e equipamentos), suporte às facilidades (e.g. suprimento de energia).

Esse modelo aponta para a necessidade de uma estrutura organizacional. Enquanto parte diretamente ligada a estratégia organização, essa estrutura pode limitar ou não a ação de cada elemento do sistema.

### *Sistema de serviço*

A oferta de uma empresa a um determinado mercado sempre inclui algum tipo de serviço. O componente serviço pode ou não ser parte explícita dessa oferta, mas

sempre irá existir. Para que produzir um bem sem que esse esteja acompanhado de um serviço de venda?

Na verdade, assim como não existe a manufatura pura, sem a adição de algum serviço acessório, não há o que se chama indústria de serviços. Há, sim, setores industriais cujos componentes de serviços são maiores ou menores em relação a outros setores. E, de algum modo, todos estão na área de serviços [Levitt, 1981].

De acordo com Philip Kotler:

*“Serviço é qualquer ato ou desempenho que uma parte possa oferecer a outra e que seja essencialmente intangível e não resulte na propriedade de nada.” [Kotler, 1967]*

Sistemas de serviço necessitam de uma abordagem específica para sua administração. Em negócios que envolvem produtos, esses ficam em prateleiras, a vista dos consumidores, prontos para serem comprados. Já serviços são intangíveis, variáveis e perecíveis [Levitt, 1981]. Esses são produzidos e consumidos simultaneamente, o que afeta seu resultado de acordo com a interação de um fornecedor com seus consumidores [Kotler, 1967].

Especial atenção deve ser dada às distinções entre produtos e serviços, pois são essas que impõem grandes desafios no projeto e na gestão de sistemas de serviço.

### *Planejamento e controle*

No contexto desta tese, para se definir o processo de planejamento e controle, é fundamental entender sua relação com a estratégia da empresa e como esse afeta toda administração da organização. Trata-se de um ambiente voltado para a Administração Estratégica:

*“Administração Estratégica é definida como um processo contínuo e iterativo que visa manter uma organização como um conjunto apropriadamente integrado a seu ambiente.” [Certo & Peter, 1990]*

Conceito importante nessa definição, a visão da organização como um conjunto implica no comprometimento de cada componente com esse processo. Em cada nível, seja esse relacionado a uma área executiva ou operacional, foco deve ser dado no apoio do planejamento estratégico. Como resultado, a organização passa a ser vista como um sistema hierárquico (figura 2.2), integrado, regido por suas estratégias, e estas pelos estados dos ambientes internos e externos.

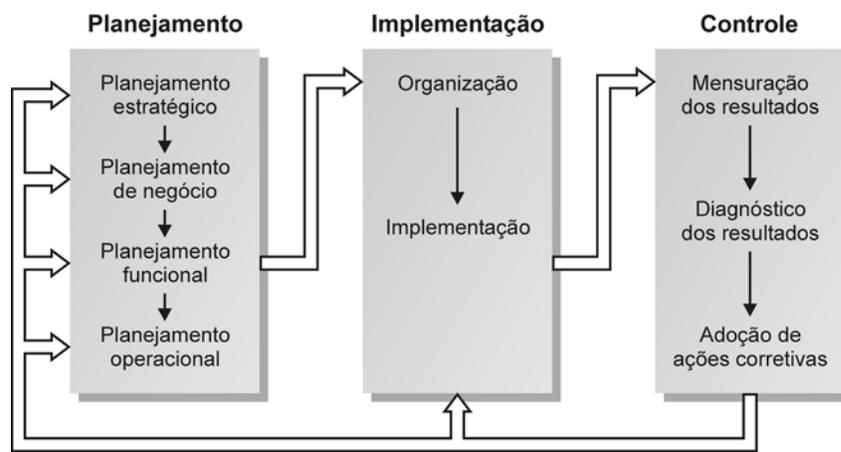


Figura 2.2: Sistema hierárquico de Administração Estratégica [adaptado de Kotler, 1967]

No nível superior dessa hierarquia, está o Planejamento Estratégico da empresa, definindo num horizonte de longo prazo quais direções devem ser seguidas. À medida que planos vão sendo delineados para níveis mais operacionais, mantendo sempre a rastreabilidade com as decisões estratégicas, ações são descritas para horizontes mais próximos.

Para garantir que a implementação desses planos resulte no desempenho esperado, um sistema de controle eficaz deve ser estabelecido. Seu enfoque deve ser tanto interno quanto externo. Ainda, padrões aos quais se possa comparar o desempenho real de cada nível da organização devem ser estabelecidos. Se esse desempenho estiver fora dos padrões estabelecidos, ações corretivas devem ser tomadas, redirecionando a organização como um todo para seus objetivos estratégicos.

A quantidade de níveis na hierarquia da Administração Estratégica é característica específica de cada organização. Para o contexto desta tese, pode-se dizer que uma organização típica é formada por [Wright et al., 1998]:

Nível estratégico: refere-se aos planos dos altos executivos, sendo estes os sócios e principais diretores da organização. Seu papel inclui a definição da missão, da filosofia e dos objetivos gerais da organização, o desenvolvimento das estratégias organizacionais para que esses objetivos sejam alcançados com êxito e a manutenção da estrutura organizacional capaz de prover o comprometimento de todos em relação a suas determinações. Em relação ao controle estratégico, a alta administração deve decidir os elementos do ambiente externo e da organização a serem monitorados, avaliados e controlados.

Nível de negócio: diz respeito aos planos de cada uma das unidades de negócio da organização. Para uma montadora automotiva, por exemplo, haverá planos estratégicos específicos para o segmento de carros populares e outras para os carros de luxo. Enquanto no nível estratégico a principal é questão se refere a saber em que setores ou negócios se deve operar, neste nível é como se deve competir em cada um desses. Os administradores de cada unidade podem escolher entre várias estratégias para orientar seu negócio, podendo ser adotadas medidas inovadoras ou mais conservadoras, de acordo com suas vantagens competitivas.

Nível funcional: está relacionado aos planos de cada área funcional trabalhando dentro de uma unidade de negócio. Aspecto importante desse nível é a interdependência de seus elementos: uma mudança em uma função invariavelmente afetará o modo como outras funcionam. Finanças, *marketing* e pesquisa & desenvolvimento, entre outras, devem considerar a eficácia da estratégia de toda unidade de negócio, mesclando-se de forma homogênea ao se definir seus planos particulares. Nesta tese, enfoque especial será dado à função produção, a qual, neste nível hierárquico, está relacionada a seus planos de longo prazo (e.g. Plano Mestre de Produção – MPS [Wight, 1984]).

Nível operacional: é associado às operações propriamente ditas, i.e., à produção dos bens e serviços. Refere-se ao planejamento de manufatura de médio e curto

prazo, relacionado às atividades de transformar pedidos e ordens de produção em produtos.

Ainda que haja variações na maneira como esses são denominados, trata-se de níveis típicos, encontrados na maioria das organizações.

Buscando-se a expansão da aplicação de um sistema voltado para a Administração Estratégica, encontra-se em Austin (2000) uma amplitude maior em sua implementação, na qual aloca-se esse ambiente no apoio à elaboração de alianças estratégicas. No entanto, para esse intento, todo processo de rastreabilidade da estratégia deve ser estendido para além das fronteiras intra-organizacionais, i.e., várias organizações devem compartilhar e sincronizar seus planos, seguindo objetivos em comum.

E isso pode gerar dificuldades como conflitos de interesse entre as partes. Ainda, as dificuldades em se efetivar alianças estratégicas podem aumentar ainda mais quando a componente agilidade está relacionada, padrão necessário tal qual imposto pela Economia Digital e defendido por esta tese. Surge, portanto, a necessidade de estruturas apropriadas, desenvolvidas para prover a integração entre diversos níveis.

### *Planejamento e controle da produção*

As atividades de planejamento e controle da produção constituem as funções de um sistema de manufatura ou serviço que se preocupam com o gerenciamento das atividades de operação produtiva, satisfazendo a demanda dos consumidores. Seu propósito é garantir que a produção ocorra de maneira eficaz, gerando produtos da maneira correta. Isso requer a conciliação do fornecimento e da demanda em termos de volume, tempo e qualidade.

O equilíbrio entre planejamento e controle muda ao longo do tempo. Em longo prazo, a ênfase está no planejamento agregado e no encaixe das atividades no orçamento da empresa. Em curto prazo, opera dentro das limitações de recursos das operações. É a atividade de programação, uma das mais complexas tarefas no planejamento da produção, onde os programadores devem lidar com diferentes tipos de recursos simultaneamente.

Incertezas, tanto de fornecimento como de demanda, afetam a complexidade das tarefas de planejamento e controle da produção. Com isso, não apenas as atividades de controle, mas também os estudos de previsão, são vitais para o bom funcionamento dessas funções.

Existem diversas abordagens específicas na literatura que atendem aos diversos aspectos do planejamento e controle da produção. Do Planejamento de Recursos de Manufatura (MRP) [Wight, 1984], cuja visão sistêmica pode ser encontrada na figura 2.3, ao modelo japonês baseado na Manufatura Enxuta [Monden, 1983], inúmeras soluções e ferramentas podem ser encontradas e aplicadas.

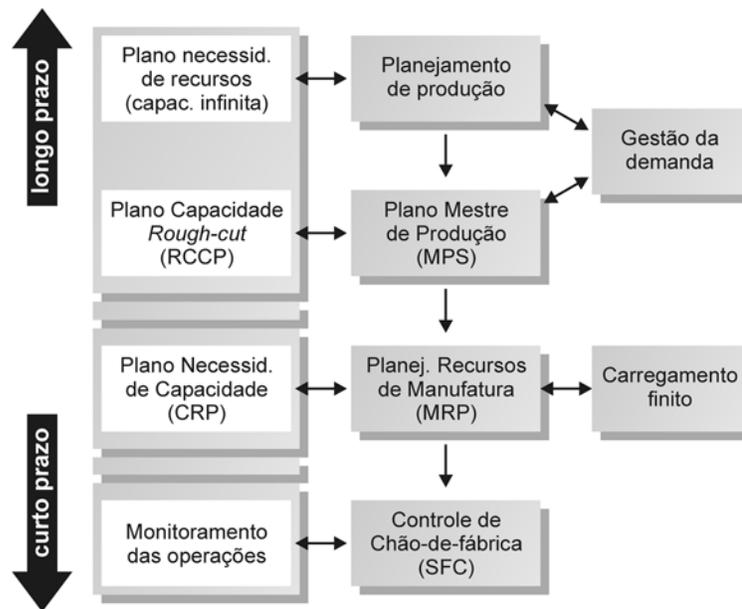


Figura 2.3: Exemplo de sistema de planejamento e controle de manufatura baseado em um MRP de ciclo fechado [adaptado de Vollman et. al, 1990]

### 2.1.2 Arquitetura

No contexto artístico, Le Corbusier, ícone do Modernismo e precursor da aplicação do cubismo sintético na arquitetura, define:

*“[Arquitetura] é o estabelecimento de padrões para enfrentar o problema da perfeição.” [Le Corbusier , 1923]*

A arquitetura se concebe (projeta) e se realiza (constrói) como resposta a uma série de condições previamente existentes [Ching, 1979]. Por suas características, essas condições podem ser simplesmente funcionais ou podem refletir, em distinto grau, propósitos de tipo social, econômico e político, incluindo suas dimensões físicas e abstratas.

Ao aplicá-la, restringe-se um sistema a se adaptar à arquitetura. Desse modo, essa pode garantir certas propriedades comportamentais a esse sistema, uma vez que seus componentes são configurados de acordo com a arquitetura.

Ainda, uma arquitetura pode ser útil de várias maneiras durante o processo de concepção, projeto, implementação e operação de um sistema.

### *Arquitetura de sistema*

Arquitetura de sistema se refere a uma solução para um problema específico. Trata-se de um produto, resultado do processo de projeto que desenvolve um modelo para atender aos requisitos de um sistema. Essa arquitetura especifica a estrutura dessa solução, seus componentes e responsabilidades, além de suas dependências, interfaces, interações e restrições.

Embora focada no desenvolvimento de programas computacionais, uma definição que atende ao contexto desta tese é:

*“Arquitetura de sistema é a estrutura dos componentes de um sistema, suas inter-relações, princípios e diretrizes que governam seu projeto e sua evolução no tempo.” [Garlan & Perry, 1995]*

O projeto de sistemas tem ficado cada vez mais complexo, sobretudo quando diferentes soluções tecnológicas de processamento de informações e comunicação são largamente empregadas. Desse modo, quando um sistema é construído, é importante que uma compreensão, que mostre seus elementos e como eles se relacionam entre si, possa ser construída.

A analogia com uma casa, um sistema específico dentro dessa definição, ajuda a entender esse conceito. Ao se projetar uma futura construção, desenhos devem ser feitos para que as idéias do arquiteto possam ser interpretadas. Múltiplas vistas e níveis de abstração devem ser criados, mostrando detalhes construtivos ocultos na visão de seu todo. Assim, para o projeto arquitetônico em si, uma linguagem, muitas vezes baseada em croquis e maquetes, é utilizada, enquanto que a apresentação de seu projeto executivo adota outros modelos e simbologias.

O mesmo ocorre na arquitetura de qualquer outro sistema, seja esse uma organização industrial ou um programa computacional, onde linguagens e abstrações específicas devem ser usadas.

### *Arquitetura de referência*

Quando uma arquitetura de sistema é utilizada como estilo ou método, essa é chamada de arquitetura de referência. Refere-se a um princípio de projeto coerente, o qual é utilizado em um domínio específico ou uma família de problemas.

Voltando a analogia com a construção civil, ao se projetar uma casa, estilos arquitetônicos, os quais implicarão nos princípios de engenharia e nas tecnologias construtivas adotadas, devem ser selecionados. De acordo com os requisitos da residência, sejam esses funcionais ou simples questões estéticas que agradam a seus futuros moradores, estilos mais arrojados ou conservadores, modernos ou clássicos, podem ser adotados.

Para sistemas de manufatura, inúmeras arquiteturas podem ser encontradas na literatura. Por exemplo, para a implementação de um sistema baseado na Manufatura Integrada por Computador (CIM) [Scheer, 1995], a Arquitetura de Sistema Aberto para CIM (CIM-OSA) pode ser selecionada (figura 2.4). Seguindo essa arquitetura, os processos de negócio de um sistema podem ser modelados de acordo com seu princípio de derivação, particularização e geração [Vernadat, 1996].

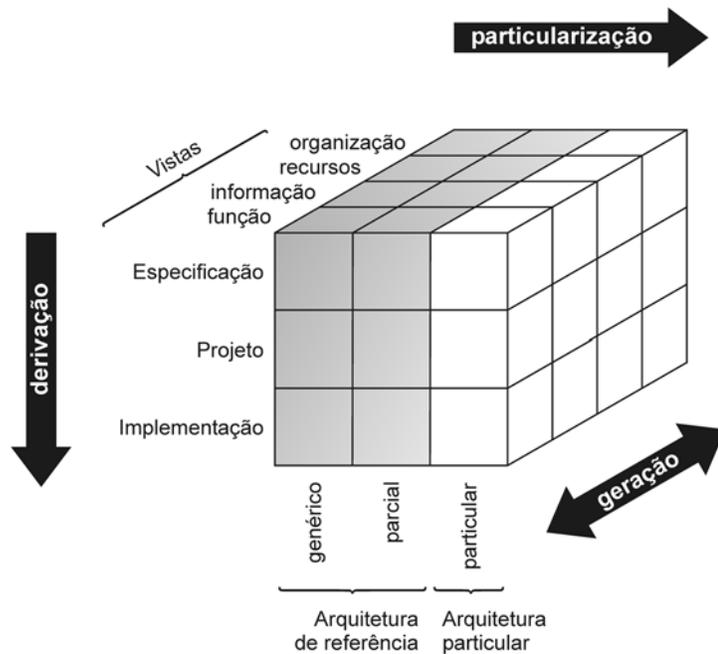


Figura 2.4: Arquitetura de referência CIM-OSA [Vernadat, 1996]

### 2.1.3 Terminologia complementar

Além das definições apresentadas até aqui, outros termos são essenciais e devem ser definidos para compor a base fundamental desta tese. São esses:

**Metodologia:** conjunto de diretrizes, técnicas e procedimentos que possam ser comprovadamente utilizados para implementar a solução para um problema específico [Houaiss, 2001]. Por exemplo, para se chegar aos desenvolvimentos desta tese, uma metodologia apurada, descrita em planos de seu projeto de pesquisa, foi adotada para gerar os resultados esperados.

**Método:** técnica ou procedimento sistemático para se fazer algo [Houaiss, 2001]. É através de um método que um objetivo pode ser alcançado, como, no caso desta tese, a referência à utilização de técnicas de projeto axiomático para a criação de um ambiente de apoio à construção de sistemas holônicos.

**Ferramenta:** instrumento utilizado para se executar uma atividade [Houaiss, 2001]. Como exemplo, ferramentas computacionais como a rede de agentes serão utilizadas para modelar a estrutura de um sistema inteligente de manufatura.

Paradigma: base filosófica ou teórica de uma escola ou disciplina na qual teorias, leis e generalizações são formuladas [Houaiss, 2001]. É a partir dessa base que experimentos que suportem essas formulações podem ser realizadas.

Tecnologia: conjunto de conhecimento científico que lida com a criação e a aplicação de descobertas e invenções, e sua relação com a vida, sociedade e meio ambiente [Houaiss, 2001]. Esta tese fez ampla utilização da tecnologia da informação como base fundamental de seus desenvolvimentos.

Infra-estrutura: arcabouço de instalações necessárias para a operação de um sistema [Houaiss, 2001]. Por exemplo, a infra-estrutura básica para qualquer sistema baseado em inteligente artificial é o computador ou qualquer outra forma não natural de processamento.

## **2.2 Do vapor à manufatura inteligente**

Meados do século XVIII, e o homem descobre a força das máquinas na produção. A utilização do vapor, sobretudo na Grã-Bretanha, muda o modo de trabalho das indústrias: é o início da Primeira Revolução Industrial. Chega a eletricidade no século XIX, e com essa a produção do aço. Há uma intensa transformação dos meios de transporte e comunicação e surgem as estradas de ferro, o automóvel, o avião, o telégrafo sem fio e o rádio. O capitalismo financeiro se consolida e nascem as primeiras grandes organizações multinacionais. [Evans, 2001]

A virada para o século XX é marcada pela moderna administração influenciada por dois nomes: Frederick W. Taylor e Henry Fayol. Fundador da doutrina da administração científica do trabalho, Taylor se preocupa em aumentar a eficiência da indústria por meio da racionalização do trabalho dos operários [Taylor, 1911]. Já Fayol, com a Escola Clássica de Administração, desenvolve técnicas para a adoção de procedimentos que visem o aumento de produtividade através do foco na estrutura organizacional das empresas [Fayol, 1916].

Mas é apenas depois da Primeira Grande Guerra que Henry Ford derruba séculos de manufatura artesanal, desenvolvendo os conceitos da Produção em Massa

[Womack et al., 1990]. Desse modo, e impulsionado pela indústria automobilística, o centro da economia mundial migra da Europa para os Estados Unidos.

Nessa mesma época, Alfred P. Sloan e a *General Motors* definem o modelo de organização corporativa [Weber, 1947] que sobrevive até os dias de hoje [Certo & Peter, 1990]. Administrador nato, Sloan mostra que o compromisso da GM não é com a concepção de automóveis, mas com sua lucratividade. No final dos anos 20, a GM ultrapassa a *Ford Motor Company* tanto no número de carros vendidos quanto nos lucros [Womack et al., 1990].

Vem a segunda-feira negra de 28 de outubro de 1929, e a crise trazida pelo *crash* da Bolsa de Nova Iorque leva ao contestamento do processo de produção no seu todo: a cadeia favorece a produtividade, mas não é flexível, e, sobretudo, ignora o homem. A corrente seguidora da Teoria das Relações Humanas conta com grandes empresas como IBM e Sears, mas o aumento da produção bélica no período faz os modelos de Taylor e Ford prevalecerem [Follett, 1941]. A vitória americana na Segunda Grande Guerra marca não apenas o triunfo de suas tropas, mas também de seu modelo de gestão.

Seguindo essa tendência, um jovem engenheiro japonês, Eiji Toyoda, visita o lendário complexo de *Rouge* da *Ford Motor Company* em 1950. Somando suas observações ao brilhantismo de um de seus colaboradores, o também engenheiro Taiichi Ohno, desenvolve-se o *Toyota Production System* e os princípios do Sistema de Manufatura Enxuta. Agora, sim, o homem, suas habilidades e raciocínio passam a ser valorizados [Womack et al., 1990].

As décadas que se sucedem são caracterizadas pelo apogeu do planejamento. Peter F. Drucker [Drucker, 1954] ganha notoriedade e a nova ordem é o Planejamento Estratégico. Numa das frases mais memoráveis e citadas da literatura administrativa, Drucker diz: “só há uma definição válida do objetivo de um negócio: criar um cliente”. Nessa época, esses objetivos são colocados por Theodore Levitt [Levitt, 1962] e Philip Kotler [Kotler, 1967] em termos do Planejamento de Marketing.

Chega o final da década de 70, e o mundo finalmente se rende a uma evidência: “os japoneses aprenderam”. O poder competitivo de suas indústrias passa a ser

conhecido e conceitos como *shojinka*, *just-in-time* e *kaizen*, há mais de vinte anos aplicados por aqueles jovens engenheiros, começam a ser disseminados por todo o mundo [Monden, 1983].

Nesse momento, o Japão afasta seu estigma de imitador de baixo custo para se impor pela qualidade. E, paradoxalmente, são dois norte-americanos, W. Edwards Deming [Deming, 1986] e Joseph M. Juran [Juran, 1980], que lhes transmitem o culto à qualidade que não conseguiram vender a seus compatriotas.

Além da qualidade, outro padrão competitivo imposto pelas indústrias japonesas é a flexibilidade [Womack, 1990]. Essa época é também marcada pela busca de sistemas cada vez mais autônomos, aumentando o nível de automação das empresas.

Desde o primeiro computador com aplicação comercial, o UNIVAC-I, entregue a *General Electric* ainda em 1954, muitos desenvolvimentos haviam ocorrido. Com o surgimento do computador pessoal (PC) no final da década de 70 [Friedrich, 1983], as operações começam a ser cada vez mais apoiadas pelas máquinas.

Planejamento de Recursos de Manufatura (MRP – *Manufacturing Resource Planning*) [Wight, 1984], Planejamento de Recursos da Empresa (ERP – *Enterprise Resource Planning*) e Gerenciamento da Cadeia Logística (SCM – *Supply Chain Management*) [O'Brien, 2003]: a integração invade gradativamente o ambiente produtivo e, nos anos 90, empresas investem seus recursos na implantação de sistemas de informação.

O final do século XX é marcado pelos benefícios da internet e as compras eletrônicas fazem com que esses sistemas integradores ultrapassem as fronteiras corporativas. Inicia-se a Era Digital [Tapscott, 1996], onde o conhecimento é o mais valioso dos bens de uma empresa. Agilidade é o novo desafio e, para isso, surgem novidades como a Manufatura Ágil [Kidd, 1994], as Empresas Virtuais [Camarinha-Matos & Afsarmanesh, 1999] e os Sistemas Holônicos de Manufatura [Valckenaers et al., 1994]. É a utilização dos conceitos da Inteligência Artificial para se criar mais do que robôs. É o início da manufatura inteligente.

## **2.3 Contexto atual das organizações**

A globalização, como efeito direto, levou a ampliação do espaço de competição [Levitt,1983]. No entanto, em um conceito mais amplo, não se tratou apenas da realização de negócios em um determinado número de países em todo mundo. Tratou-se, sim, de uma nova maneira de se fazer negócios, equiparando-se a qualidade dos produtos e serviços com as necessidades específicas dos consumidores locais. Foi uma maneira de organizar a vida empresarial, respondendo a fatores de concorrência, mercado e tecnologia.

A primeira consequência da globalização foi a construção de novos ambientes institucionais internacionais, os quais propiciaram transações de modo a alargar as fronteiras de mercados entre diferentes países. Isso pode ser visto a partir da formação dos diversos mercados comuns: NAFTA, União Européia, Mercosul, etc. E, de acordo com Chandler Jr. (1990), esse aumento no tamanho de mercado proporciona a maior divisão do trabalho, esta, então, responsável pelo mais elevado nível de desenvolvimento econômico.

No entanto, além da ampliação do tamanho do mercado, a globalização gera, como segunda consequência, mudanças qualitativas no ambiente competitivo. Os consumidores pedem maior diversificação e diferenciação de produtos e serviços, isso a uma taxa de mudança de hábitos de consumo maior. Passa-se, agora, a se privilegiar as economias de escopo, associadas a flexibilidade e disponibilidade [Chandler, 1990].

Portanto, no nível privado, a globalização implica em mudanças de padrões competitivos [Schonberger, 1996] que requerem uma re-estruturação que assuma os requisitos dos novos arranjos institucionais. Essa re-estruturação deve ocorrer nos três níveis básicos de uma empresa: o nível micro ou individual, relacionado às mudanças na atitude ou no comportamento das pessoas; o nível intermediário, que se refere às mudanças administrativas e organizacionais; o nível macro ou societário, onde a mudança é normalmente caracterizada por grandes transformações sociais, revoluções ou processos sócio-culturais.

### *2.3.1 Mudança de valores*

A abertura de mercado causa a intensa concorrência sendo a variável preço um fator altamente relevante. Os consumidores, à medida que estão mais interessados em produtos baratos do que quem é o fornecedor em si, criam um ambiente com certa homogeneidade de produção e prestação de serviços. Resta para as empresas, a fim de manterem sua sobrevivência, se diferenciarem [Franco & Batocchio, 1999].

O aumento do valor como uma meta no planejamento de futuros negócios volta a ser foco de muitas empresas, assim como fora outrora. Antonio Batocchio mostra que o conhecimento é o principal ingrediente do que se produz, faz, compra e vende [em Franco, 1998]. Os capitais necessários para a atual criação de valor (riqueza) não são a terra nem o trabalho físico, tampouco as ferramentas mecânicas e fábricas. Ao contrário, são os ativos baseados no conhecimento. A inteligência tomou o lugar da matéria e da energia. Surge, então, um novo conceito: o Capital Intelectual.

O Capital Intelectual é a soma de tudo o que as pessoas da empresa sabem que leva a uma vantagem competitiva no mercado [Edvinsson & Malone, 1997]. Assim, o valor de mercado de uma empresa pode ser obtido somando-se seu capital financeiro ao capital intelectual, que pode ser dividido em capital humano, capital de clientes, capital de inovação e capital de processos. O Capital Intelectual pode ser incrementado através da expansão da inteligência, do encorajamento a inovação e do exercício da integridade.

Esse conceito pode, ainda, ser extrapolado, colocando a filantropia como fator de diferenciação [Vassallo, 1998]. De um lado, as corporações transmitem conceitos como avaliação de resultados, estabelecimento de metas, foco, parcerias estratégicas. De outro, há creches, orfanatos e asilos. Tudo isso pode estar ligado a algo que vai além da benesse do mercado: a função social da empresa, o quanto ela é importante para a sociedade, também agrega valor, criando um fator que leva a vantagem competitiva.

### *2.3.2 Competência tecnológica*

Com a concorrência acirrada ainda mais pela Economia Digital, investimento e inovação se tornam fatores decisivos para liderança de uma empresa. O confronto com novas

tecnologias é essencial para a sobrevivência no ambiente competitivo [Franco & Batocchio, 1999].

A competência tecnológica é um componente importante na estratégia de qualquer empresa, refletindo-se não apenas em seus produtos, mas também em suas técnicas de produção. É a busca por novos caminhos para enfrentar seus desafios.

De acordo com Niefer (1990), a base da competência tecnológica é a pesquisa direcionada para o futuro, aumentando o peso dos investimentos nas áreas de Pesquisa & Desenvolvimento com finalidades de:

- Preparar em tempo hábil uma base tecnológica segura.
- Desenvolver novos trabalhos para se formar uma base de inovações.
- Prestar auxílio em questionamentos novos e não convencionais.
- Assumir um papel de pioneirismo e dar orientações.

Por maior que seja uma empresa, o tamanho desses investimentos não deve ser um critério único de êxito. Em vistas da quantidade de desenvolvimentos sendo realizados em seu ambiente externo, a colaboração é uma medida de desempenho a ser considerada. A associação de pesquisas internas com projetos de cooperação com institutos de ensino e pesquisa, esses, sim, integrados com novas tecnologias de uma forma multidisciplinar, se torna fundamental nesse contexto.

Dessa forma, a pesquisa indica novos caminhos e possibilidades, gerando estratégias futuras que formam um recurso importante num ambiente caracterizado pela rápida transformação tecnológica. Isso, sem dúvidas, influenciará a posição econômica futura da empresa.

## **2.4 Modernos sistemas de manufatura**

No entanto, ainda que a economia global tem anunciado o aumento de competição, as indústrias não têm mudado seu modo de produção para atender às novas exigências. Com base no resultado de estudos em mais de 500 empresas, Schonberger (2001) argumenta que as maiores companhias de manufatura estão perdendo força. Seus

problemas estão arraigados com a complacência, a satisfação com inventários elevados, os projetos pobres, os equipamentos ruins, as estruturas organizacionais antiquadas, os problemas de gestão do trabalho e, até mesmo, com acordos para agradar investidores.

Nessa indicação de que há problemas nas atuais práticas de manufatura, o melhor remédio a ser prescrito é a quebra de paradigmas. É nesse contexto que se cunha o termo “moderno sistema de manufatura”, definindo esse como nome a ser dado a cada sistema de manufatura capaz de atender aos desafios do século XXI.

A seguir, são apresentados exemplos bem sucedidos, sejam esses práticos ou acadêmicos, do desenvolvimento de modernos sistemas de manufatura.

#### *2.4.1 Manufatura Ágil*

Uma resposta às exigências de mercado é a sua fragmentação, levando a customização em massa, na qual o sistema de produção é exigido ao máximo para prover soluções individualizadas ao segmento específico de mercado. Esmail e Saggu (1996) apresentam algumas mudanças de paradigma necessárias para as empresas enfrentarem o futuro, destacando-se:

- Disponibilizar novos produtos de forma rápida.
- Assimilar facilmente experiência e inovações tecnológicas.
- Utilizar sistemas de produção re-programáveis e re-configuráveis.
- Produzir uma unidade com o mesmo custo de grandes lotes.
- Focar nos ganhos do negócio e não no lucro do produto.

Nesse cenário, são colocados novos desafios ao sistema de manufatura, já que esse precisa atender consumidores em diferentes mercados sem prejuízo de custo e *lead time*. Como resposta, surge o conceito de Manufatura Ágil:

*“Manufatura Ágil é a habilidade de uma empresa de administrar a mudança, no imprevisível mundo do comércio e da indústria e, sobreviver no mercado que demanda uma rápida resposta às inesperadas mudanças*

*nas demandas do consumidor, nos desafios competitivos e nas rupturas tecnológicas.” [Owen & Kruse, 1997]*

Ainda, segundo Esmail & Saggi (1996), uma empresa ágil demanda processos de manufatura capacitados a explorar as oportunidades num clima de incerteza, imprevisível e em condições de mercado altamente turbulentas. A empresa ágil é aquela com capacidade de reagir rapidamente às mudanças de ambiente.

Kidd (1994) afirma que Manufatura Ágil pode ser considerada como uma estrutura dentro da qual cada companhia pode desenvolver suas próprias estratégias de negócios e de produtos. Para se atingir a Manufatura Ágil, a empresa deve se enfocar nas funções e inter-relações entre (e dentre) seus três recursos primários:

Pessoas: qualificação (habilidade de conhecimento) e pessoas com *empowerment*.

Organização: estrutura organizacional de administração inovadora.

Tecnologia: flexível e inteligente, adaptada em função das pessoas.

Os sistemas de manufatura vêm evoluindo na direção da Manufatura Ágil. Na figura 2.5, pode-se ver as características de cada sistema e sua evolução para a agilidade.

	Artesanal	Massa	Enxuta	Ágil
Reconfigurável				
Flexível				
Fixa				
Abrangente				

Figura 2.5: A evolução para a agilidade dos sistemas de manufatura [Gould,1997]

Finalmente, para que uma empresa se torne ágil, ela deverá realizar mudanças em sua cultura, em sua prática de negócio e nas relações com as demais empresas ao redor do mundo. Gould (1997), analisando empresas inglesas, afirma que com agilidade ocorrerá uma transformação do modelo tradicional para um modelo que está emergindo. Esse modelo irá variar para diferentes tipos de organização, mas

provavelmente conterá um número de elementos genéricos. O desafio é descobrir o que é apropriado e em que nível as pessoas terão de conduzir a implementação da agilidade nas companhias de manufatura.

#### 2.4.2 Empresas Virtuais

Um dos mais avançados entre os paradigmas associados ao princípio de cooperação entre empresas é a Empresa Virtual (VE). O PRODNET II (*Production Planning and Management in an Extended Enterprise*), grupo internacional de pesquisa financiado pelo programa europeu *Esprit*, fornece a seguinte definição:

*“Uma Empresa Virtual é uma aliança temporária de empresas que se unem para compartilhar habilidades e recursos de modo a responder melhor a oportunidades de mercado, e cuja cooperação é suportada por redes computacionais.” [Camarinha-Matos & Afsarmanesh, 1999]*

Empresas podem cooperar entre si em todo ciclo de vida de um produto. Essa cooperação pode ser guiada por várias razões como redução de custos, ganho de flexibilidade e foco em competências chave.

O processo de fabricação em empresas virtuais envolve uma vasta gama de tecnologias, incluindo recursos de *hardware* e *software* para formar um ambiente integrado. Assim, a formação de uma Empresa Virtual implica que suas empresas utilizem mecanismos de comunicação para troca de informações e sincronização de suas operações. Serviços de alto nível, como o suporte ao desenvolvimento cooperativo de produtos, exigem infra-estruturas bastante robustas, seguras e eficientes. No nível administrativo, inúmeras ferramentas devem ser disponibilizadas para efetivar a cooperação entre as empresas [Fraga et al., 2003].

Outro paradigma diretamente relacionado às Empresas Virtuais é a Empresa Estendida [Browne & Zhang, 1999]. Esta também trata da formação de um ambiente que aproxima a coordenação de empresas de manufatura independentes e seus respectivos fornecedores. No entanto, seu conceito está baseado numa formação não

temporária que, ao contrário das Empresas Virtuais, possibilita que objetivos estratégicos de longo prazo possam ser estabelecidos.

### 2.4.3 *Consórcio Internacional de IMS*

No final dos anos 80, Hiroyuki Yoshikawa já havia reconhecido que nenhuma organização, ou mesmo país, poderia aprender por si só o suficiente para formar a base para avanços futuros neste complexo mundo [Yoshikawa, 1993]. Assim, ele propôs o desenvolvimento de um esquema de compartilhamento de experiências e inteligência.

Uma das iniciativas inspiradas nos trabalhos de Yoshikawa foi o denominado Consórcio Internacional de IMS (Sistemas de Manufatura Inteligentes), que pretende levantar novas luzes sobre o que se fazer para se tornar competitivo no século XXI. Os governos da Austrália, Canadá, Japão e Estados Unidos acordaram e, em 1995, o Consórcio Internacional de IMS foi sediado no Canadá para gerenciar e direcionar suas operações [ISC1, 1995]. Hoje, a Suíça, a Noruega e a Coreia também participam desse seleto grupo [ISC3, 1996].

O Consórcio Internacional de IMS compreende uma pequena secretaria suportando um Comitê Diretor Internacional que capta recursos de todos os participantes. Seu objetivo vem sendo a criação de novas tecnologias que atendam as necessidades do século XXI [ISC16, 2003]. Em uma análise de viabilidades, seis estudos de caso foram aprovados em 1994. Hoje, já são mais de 15 projetos concluídos, dentre os quais se destacam os projetos expostos nas seções seguintes.

#### *Test Case 4 – Globeman 21*

O *Globeman 21* (*Enterprise Integration for Global Manufacturing for the 21st Century*) foi um projeto industrial direcionado para a criação de novos processos e tecnologias para a manufatura do século XXI [Nemes & Brown, 1998]. Coordenado pela *Toyo Engineering Corporation*, esse projeto contou com a participação de empresas como a *IBM Japan*, *Toyota Motor Corporation* e a *Omron Corporation*. No lado acadêmico, estiveram unidas instituições como a *Carnegie-Mellon University*, nos Estados Unidos, o *Fraunhofer Institute fur Produktionstechnik und Automatisierung*, na Alemanha, e a *University of Tokyo*, no Japão.

Sua missão foi demonstrar como transformar as práticas de manufatura para estruturas rígidas de cadeias de fornecedores em redes dinâmicas formadas por empresas ágeis globalmente distribuídas. Com o alcance de seus principais objetivos, novos processos de negócio, seus métodos, modelo e tecnologias, foram criados para esse ambiente de manufatura global.

Com o término do *Globeman 21* em 1999, surgiu um novo projeto, o *Globeman* (*Global Engineering and Manufacturing in Enterprise Networks*), cujo objetivo foi promover a colaboração no desenvolvimento de projetos entre diferentes companhias distribuídas através da exploração do estado da arte em infra-estruturas para tecnologia de informação [van Busschbach et al., 2002]. Concluído em abril de 2003, o projeto Globeman desenvolveu a Arquitetura de Referência e Metodologia para Empresas Virtuais (VERAM), a qual, de acordo com a figura 2.6, estrutura o conhecimento que suporta o trabalho em engenharia e manufatura global em redes de empresas.

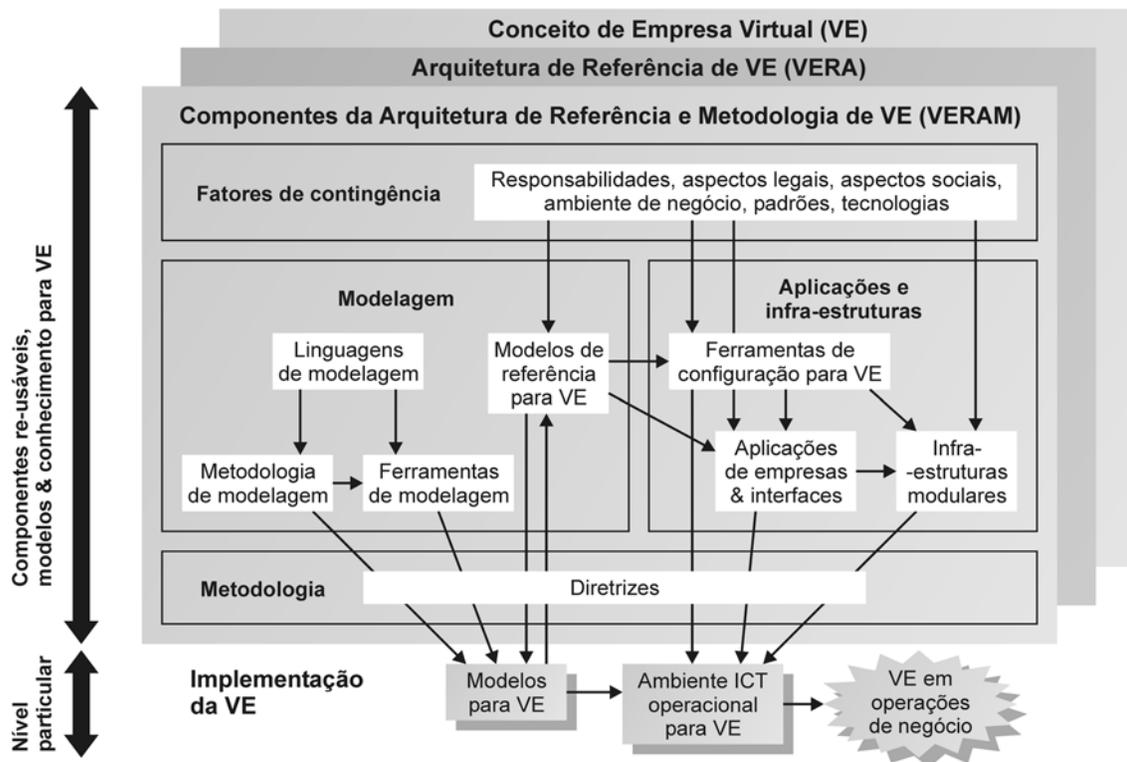


Figura 2.6: Componentes da arquitetura de referência do projeto Globeman [Vesterager et al., 2002]

## *Test Case 5 – Holonic Manufacturing Systems*

Os sistemas de manufatura integrados em cadeias logísticas convencionais estão se tornando obsoletos e serão gradualmente abandonados. Por isso, algumas iniciativas, objetivando o desenvolvimento de novas tecnologias, vêm sendo tomadas. Uma dessas é o desenvolvimento do Sistema Holônico de Manufatura (HMS) [Valckenaers et al., 1994].

Coordenado pela *Toshiba Corporation*, o projeto HMS do Consórcio Internacional de IMS teve a participação de empresas como *Hitachi Ltd.*, *Rockwell* e *Mercedes Benz*. Como apoio acadêmico, participaram, entre outros, a *Kobe University*, no Japão, a *University of Calgary*, no Canada e a *Katholieke Universiteit Leuven*, na Bélgica.

Base desses trabalhos, e ponto fundamental desta tese, é a colocação feita pelos pesquisadores de Leuven e de Calgary:

*“A próxima geração de sistemas (inteligentes) de manufatura formarão efetivamente, de forma distribuída, fábricas virtuais re-configuráveis, nos quais módulos humanos (pessoas), máquinas e programas se interagem em grupos virtuais, formados dinamicamente. Tais sistemas podem ser modelados como inteligentes, autônomos e de elementos cooperativos, os quais formam sistemas re-configuráveis, extensivos e gradativos.” [Van Leeuwen & Norrie, 1997]*

Partindo do paradigma holônico de Arthur Koestler [Koestler, 1967], o HMS vem emergindo como um sistema de manufatura avançado. Ainda segundo os princípios do HMS, a melhor maneira de se enfrentar os desafios do século XXI é através de um sistema aberto, distribuído e inteligente, formado por unidades modulares de grande flexibilidade, possíveis, ainda, de serem re-utilizáveis. Essas unidades devem ser capazes de se organizarem de acordo com seu ambiente, respondendo de forma inteligente a distúrbios não previsíveis, mantendo uma produção suave e contínua.

Com o término do projeto HMS em junho de 2000, uma segunda se iniciou [ISC12, 2000].

#### 2.4.4 Paradigmas relacionados ao HMS

Uma vez que os conceitos sobre Sistemas Holônicos de Manufatura são essenciais para o desenvolvimento desta tese, esses serão tratados mais profundamente no restante do trabalho. No entanto, existem algumas peculiaridades desse sistema em relação ao desenvolvimento de outros sistemas de manufatura que devem ser mencionadas neste ponto.

Ao citarem paradigmas de controle de manufatura emergentes, alguns autores [Tarumarajah et al., 1996; Bell et al., 1999; Leitão & Restribo, 2001] comparam os sistemas holônicos com a Manufatura Biônica e a Fábrica Fractal. Embora não mais tão emergentes, os conceitos desses três paradigmas possuem algumas sobreposições, sobretudo no que diz respeito a seus esforços em definir relações de partes e todos a partir da pesquisa de vários aspectos da natureza como organismos vivos e sociedades.

Já a principal diferença desses paradigmas está na abordagem adotada para conceber tais relações. Enquanto o paradigma holônico segue o conceito de todos com características de partes, os demais possuem as seguintes particularidades:

Manufatura Biônica: modela sistemas de manufatura tendo como base a hierarquia de componentes encontrados em sistemas biológicos, como células, órgãos e organismos [Okino, 1992]. Como existem vários exemplos na Biologia de sistemas que possuem a capacidade de se adaptarem a mudanças em seu ambiente, o objetivo da Manufatura Biônica é projetar um sistema artificial com características similares de auto-organização. Para isso, Okino (1992) propõe o neologismo *modelon*, o qual é composto por operadores e memória comum e a hierarquia de *modelons* filhos. Os operadores apóiam a comunicação e outras interações entre os *modelons* filhos. A memória comum, tal qual em quadro negros, estruturas de processamento de informação utilizadas pela Inteligência Artificial, é o meio de comunicação para esses operadores e *modelons* filhos.

Fábrica Fractal: é um conceito originado na Teoria de Geometria Fractal proposto por Benoit B. Mandelbrot [Mandelbrot, 1982], a qual fornece ferramentas para analisar e descrever objetos geométricos em espaços multidimensionais. A palavra

fractal vem do latim *fractus*, que significa quebrado ou fragmentado. Cada um desses fractais contém as características básicas da estrutura como um todo. Acredita-se que essa idéia provê meios para integrar operações de fábricas e organizações de maneira eficiente [Warnecke, 1992]. As características de uma fábrica fractal incluem auto-similaridade, auto-organização, auto-otimização, orientação a objetivos e dinamismo. Uma das implicações da auto-similaridade é que cada fractal deva ser uma (pequena) Fábrica Fractal.

Além das diferenças conceituais apontadas, cada paradigma possui um contexto próprio no qual foram concebidos. Isso faz com que sua implementação seja mais compatível a determinadas culturas industriais. No entanto, não fazendo parte do escopo deste trabalho uma discussão detalhada comparando esses sistemas, sua análise limita-se aos pontos apontados.

## Capítulo 3

# O Paradigma Holônico

*Esta tese busca contribuir com o desenvolvimento de sistemas mais aptos para enfrentarem os desafios deste século através da aplicação de novos paradigmas para manufatura. Seu fundamento principal está baseado nos holons e holarquias criados por Arthur Koestler [Koestler, 1967]. Mas a simples aplicação desse paradigma em ambientes de manufatura não leva diretamente a novas soluções, devendo, para esse fim, serem utilizados estudos em áreas como a Psicologia, a Biologia e a Sociologia para prover metáforas que melhorem o entendimento do problema em questão. É a utilização da Postura Intencional sustentada no começo deste trabalho [Dennett, 1996].*

*Para tanto, este capítulo partirá de um melhor discernimento sobre o que é inteligência, mostrando o ponto de vista de um sistema social em busca de agilidade para solucionar seus problemas. Uma vez compreendido esse conceito, suas coordenadas serão mudadas para o foco desta tese: organizações inteligentes capazes de atender às necessidades da manufatura neste começo de século. Apontada como um dos principais problemas no contexto apresentado, a coordenação desses sistemas, seu planejamento distribuído e a negociação de eventuais conflitos, será tratada segundo os requisitos dos sistemas distribuídos. Os princípios e conceitos do paradigma holônico serão, então, apresentados. Ciente de que seu entendimento é fundamental para todo o desenvolvimento desta tese, o uso de metáforas e ilustrações práticas mostrará como esse paradigma poderá ser utilizado para modelar o comportamento de sistemas sociais ou biológicos.*

### **3.1 O que é inteligência?**

Embora se saiba reconhecer claramente um comportamento inteligente, a definição absoluta de inteligência desafia muitos cientistas. Aspecto específico dessa questão, o qual pode ser encontrado desde a mitologia grega, o desenvolvimento de máquinas inteligentes que capturem a vitalidade e a complexidade da mente humana é objeto de desejo de muitas sociedades [Brooks, 2002].

Alguns psicólogos vêem a inteligência como uma capacidade geral para a compreensão e o raciocínio que se manifesta de várias maneiras. Surge, assim, o seguinte conceito que, nas mãos de Alfred Binet e Théodore Simon se tornou a base fundamental para os primeiros testes psicológicos de inteligência:

*“Parece-nos que, na inteligência, existe uma faculdade fundamental, cuja alteração ou ausência é da mais extrema importância para a vida prática. Esta faculdade é o julgamento, também chamado de bom senso, iniciativa, faculdade de adaptação de si mesmo às circunstâncias. Para o bom julgamento, a boa compreensão e o bom raciocínio, essas são atividades essenciais da inteligência.” [Binet & Simon, 1905]*

Alan M. Turing, pioneiro nos estudos das relações entre máquinas e inteligência, estimula a todos com o Teste de Turing. É a substituição da questão da inteligência por um teste empírico. Em seu trabalho *“Computing Machinery and Intelligence”*, Turing diz:

*“Acredito que no fim do século o uso de palavras e a opinião geralmente educada terão se alterado tanto que alguém será capaz de falar de máquinas pensantes sem ser contradito.” [Turing, 1950]*

Allen Newell, autor de inúmeras colaborações para as Ciências Cognitivas, introduz um sistema de símbolos físicos como uma forma de representar a natureza essencial de fenômenos associados à inteligência. Esse modelo, segundo Newell, é uma condição necessária e suficiente para a construção de sistemas inteligentes generalizados. Para isso, o conhecimento é de uma natureza superior, devendo ser tratado no que Newell chama de nível do conhecimento (*knowledge-level*) [Newell, 1982; Newell, 1990]. É a partir desse conceito que se define inteligência como sendo a condição na qual um sistema se aproxima do nível de conhecimento.

Contrário a esse princípio, Rodney A. Brooks organiza em seu artigo *“Elephants don’t play chess”* um manifesto argumentando que comportamentos inteligentes não necessitam nem de representação e nem de inferência [Brooks, 1990]. Segundo ele, o

simbolismo, no qual a Inteligência Artificial se baseou em seus primeiros trinta anos, é carente e impõe limitações severas para seu desenvolvimento. Desse modo, ele sugere uma nova metodologia baseada na decomposição da inteligência em comportamentos individuais, gerando módulos cuja co-existência e cooperação provêm a emergência de comportamentos mais complexos. Para isso, é explorada uma metodologia de pesquisa na qual se enfatiza interações físicas com o ambiente como uma fonte primária de restrições para o projeto de sistemas inteligentes.

Já a Semiótica de Charles S. Peirce, disciplina das Ciências Humanas denominada "arte dos sinais", estuda a inteligência a partir de aspectos básicos dos fenômenos de cognição e comunicação [em Gudwin, 1996]. Enquanto a cognição trata da apreensão e compreensão dos fenômenos que ocorrem no ambiente, a comunicação estuda como os fenômenos apreendidos e compreendidos podem ser transmitidos entre os seres inteligentes. Para isso, essa utiliza uma estrutura básica que é o signo (ou *representamen*), o qual é qualquer coisa que representa algo para alguém sob certo aspecto ou modo. Traduzindo seus conceitos para a busca de sistemas inteligentes, surge a Semiótica Computacional, a qual é a tentativa de emular ciclos semióticos em computadores digitais [Gudwin, 1996].

Independentemente da aceitação ou rejeição de qualquer teoria, o estudo e a compreensão da inteligência humana têm levado a muitos desenvolvimentos científicos. Da idéia de que a lógica é a base de toda Matemática, de acordo com o "*Principia Mathematica*" de Alfred N. Whitehead e Bertrand Russell [Whitehead & Russel, 1924], e passando pela arquitetura de computadores de John von Neumann [von Neumann, 1966], o século XX foi testemunha de uma coleção de trabalhos cujo desenvolvimento culminou, sobretudo, nos atuais sistemas computacionais.

Segundo Marvin Minsky, ganhador do *ACM A.M. Turing Award*, assim como Herbert A. Simon e Allen Newell, o maior desafio é dar bom senso às máquinas. Minsky (1985) disserta sobre o surgimento da inteligência a partir da não inteligência. Mostrando que a mente pode ser construída de pequenas partes, cada uma ignorante em sua simplicidade, sustenta-se a idéia de que sua agregação numa configuração especial pode levar a inteligência. A partir desse conceito, desenvolve-se sistemas

artificiais capazes de raciocinarem, aprenderem e até mesmo, um dia quem sabe, emocionarem-se.

E é nessa direção que, sem a pretensão de tentar ser absoluta em sua definição, esta tese enxerga inteligência como:

*Inteligência é a habilidade de um sistema em integrar autonomia, cooperação e organização de forma eficaz, de modo a prover meios para se adaptar a diferentes situações e utilizar todo o conhecimento que se tem a sua disposição para conduzir a solução de um problema.*

Trata-se de uma interpretação da inteligência enquanto sistema (figura 3.1), a qual denota, ainda que de maneira tácita, a existência de indivíduos. Sua base é a formação de uma sociedade, conjunto que independe do nível intelectual de seus constituintes. É uma definição desafiadora, que lança o problema de conceber, desenvolver e manter tais sociedades.

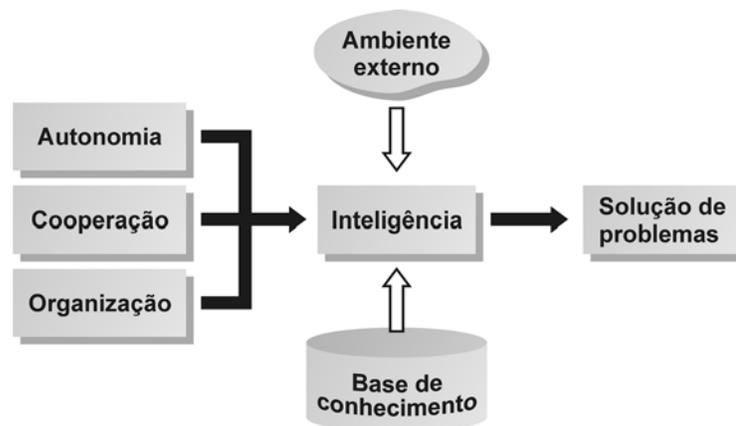


Figura 3.1: Visão sistêmica da definição de inteligência

## 3.2 Comportamento social

A agregação associada à cooperação, fazendo com que animais ajam em conjunto, leva ao estudo de seu comportamento social, ou, numa forma mais genérica, ao estudo da cooperação entre indivíduos. Assim como o fisiologista pergunta como o indivíduo, o

órgão ou a célula se mantém pela cooperação organizada de seus constituintes, o sociólogo tem que perguntar como os constituintes do grupo, seus indivíduos, se organizam para manter o grupo.

Um conjunto de empresas formando uma organização pode ser dito social, enquanto que uma empresa atuando sozinha é solitária. Embora “social” indique que exista mais que um indivíduo (pelo menos dois), nem toda agregação é social [Franco & Batocchio, 2000]. O Prêmio Nobel em Fisiologia e Medicina Nikolaas Tinberger ilustra essa questão através do comportamento de insetos e pássaros:

*“Quando, numa noite de verão, centenas de insetos se juntam em torno de nossa lâmpada, esses não são necessariamente sociais. Podem ter chegado um a um [...]; agregando-se porque foram atraídos pela lâmpada. Mas ‘starlings’ [pássaros comuns nos Estados Unidos] nos finais das tardes de inverno, executando suas fascinantes manobras aéreas, [...] realmente se interagem; eles seguem uns aos outros numa maneira tão perfeita que nos leva a crer que possuem poderes super humanos de comunicação.” [Tinbergen, 1964]*

Vê-se que a agregação é apenas um prelúdio que pode levar ou não a cooperação. Com base nessa observação sobre o texto de Tinbergen, é possível entender que nem todo agrupamento de empresas forma necessariamente uma sociedade. Para ser social, não é suficiente que um grupo de empresas tenha atrações em comum, como no caso dos insetos em torno da lâmpada. Mas, tal qual pássaros voando numa forma coordenada, e evidentemente mostrando cooperação, bons exemplos de organizações devem exibir um comportamento social avançado.

Tradicionalmente, um indivíduo é definido como uma unidade indivisível e auto-assertiva, com uma existência separada e independente. No entanto, esse sentido absoluto não é encontrado em nenhum lugar: há, ainda, a cooperação e a interdependência.

Para se tornar parte de uma sociedade, um indivíduo deve ser capaz de combinar seus valores e sua autonomia com as necessidades do conjunto. E isso requer que o indivíduo esteja ciente de suas próprias necessidades e daquelas de sua coletividade. Ainda, certo tipo de controle, seja esse resultado de sua própria consciência ou imposto pela sociedade em si, deve conjugar o compromisso entre os dois.

O papel social que uma empresa desempenha, enquanto indivíduo inserido nesse ambiente, é definido por regras, permissões e responsabilidades associadas com padrões comportamentais específicos. Mas existe também a liberdade que, assim como no desenvolvimento científico, fornece a flexibilidade e garante a evolução desse sistema.

Como será explicado oportunamente nesta tese, Koestler (1967) chama essa essência dualista de efeito Janus, o qual é uma característica fundamental encontrada em qualquer estrutura hierárquica.

### **3.3 A organização inteligente**

Em muitos sistemas tecnológicos, há a tendência de se reduzir a rigidez e exponencialmente aumentar sua complexidade através da decomposição desse sistema em unidades menores. Essas unidades se comportam como sistemas independentes, sendo sua gestão mais facilitada. Exemplo está na aplicação da Programação Orientada a Objeto (OOP) para o desenvolvimento de programas computacionais de larga escala [Rumbaugh et al., 1991].

A mesma tendência pode ser encontrada na gestão de modernos sistemas de manufatura. Seja no desenvolvimento de Empresas Virtuais [Camarinha-Matos & Afsarmanesh, 1999] e Empresas Estendidas [Browne & Zhang, 1999], ou mesmo numa representação apurada de empresas ágeis mais tradicionais (não formadas através de parcerias), a aplicação de modelos modulares se mostra bastante eficiente (nesta tese, esse princípio é aplicado para a formação e operacionalização de organizações inteligentes).

O entendimento de uma organização inteligente parte da definição do que é competência chave:

*“Competências chave são o aprendizado coletivo na organização, especialmente como coordenar diversas habilidades de produção e integrar múltiplas tendências tecnológicas.” [Prahalad & Hamel, 1990]*

As competências chave representam as principais vantagens competitivas de uma empresa sobre suas rivais. Essas emergem no tempo através de um processo organizacional de acumular conhecimento sobre como explorar diferentes recursos e capacidades. Trata-se da essência que torna uma empresa única em sua habilidade de prover valor a seus clientes durante um longo período de tempo [Prahalad & Hamel, 1990].

Em uma Empresa Virtual, melhorias contínuas ocorrem em seu nível de rede porque essa está constantemente melhorando a coordenação e a comunicação entre seus nós. No nível de empresa, cada elemento está constantemente melhorando sua competência chave. Ainda, a rede deve se re-configurar constantemente para prover a organização virtual de competências que representem diferenciais competitivos, fazendo com que participem de uma organização virtual apenas as empresas que apliquem as “melhores práticas” em suas áreas de atuação.

No entanto, como essas empresas devem interagir para atingirem seus objetivos e os da organização virtual como um todo, alguns interesses particulares podem afetar outras empresas. Assim, foco especial deve ser dado à coordenação como forma de gerenciamento das interações existentes em uma Empresa Virtual.

### *3.3.1 Coordenação em processos de negócio distribuídos*

Quando um processo de negócio (BP) é executado por uma Empresa Virtual, partes de sua decomposição são atribuídas a diferentes empresas, tornando-se um processo de negócio distribuído (DBP) [Rabelo et al., 1996]. O problema de coordenação se torna, então, mais importante, uma vez que seu escopo não está limitado a uma única

empresa, mas a nós autônomos, distribuídos e heterogêneos de uma rede, os quais devem, ainda, cooperar entre si.

Os processos de negócio em diferentes membros da Empresa Virtual devem estar direcionados para os objetivos globais da organização, devendo, para isso, ser orquestrados apropriadamente. E é justamente a essa habilidade de coordenar as ações e competências chave de cada empresa em um ambiente de processos de negócio distribuídos que o nível de inteligência de uma Empresa Virtual está associado.

O propósito da coordenação é alcançar (ou evitar) situações consideradas desejadas (ou indesejadas) por uma ou várias empresas, possibilitando que o sistema possa evoluir de maneira harmônica e segura.

Nesse ambiente, dois padrões contrastantes podem se tornar visíveis: a cooperação e a negociação (figura 3.2). Cooperação, pré-requisito para qualquer comportamento social, é a coordenação de indivíduos não-antagônicos, enquanto negociação se refere a indivíduos competitivos. Empresas que cooperam buscam como equipe aquilo que não conseguiriam como meros indivíduos. Empresas que competem visam maximizar seus próprios benefícios a qualquer custo para as outras.

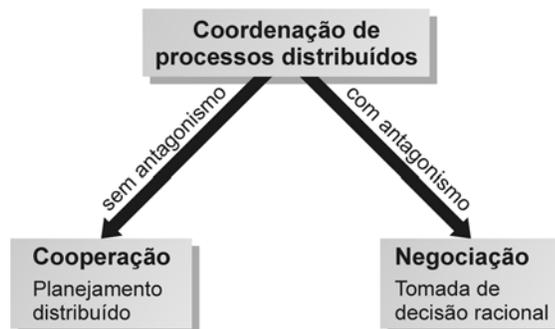


Figura 3.2: Aspectos da coordenação de sistemas distribuídos

Para as Empresas Virtuais, a questão desafiadora é construir e manter um sistema no qual cada indivíduo é uma empresa já estabelecida. Fazendo um paralelo com a Inteligência Artificial Distribuída (DAI) [Moulin & Chaib-draa, 1996], o problema a ser enfrentado é: quando e como devem quais empresas interagir (cooperar ou competir) para obterem sucesso no encontro de seus objetivos?

### 3.3.2 Estrutura de coordenação

Coerência é a medida que indica se um sistema distribuído se comporta como uma unidade. O problema é como manter a coerência global, criando-se uma estrutura capaz de determinar os objetivos em comum e dividir as tarefas de modo a evitar conflitos desnecessários. Os avanços tecnológicos em computação e comunicação possibilitaram que arquiteturas pudessem ser construídas para tratar esse tipo de problema.

Conforme mostrado na figura 3.3-a, a coordenação inteligente pode ser atingida adotam-se elementos especiais para detectar interdependências entre as atividades das diversas empresas. Essa é uma estrutura hierárquica, com coordenadores centralizados que realizam todas as tarefas de planejamento e negociação. Na outra extremidade (figura 3.3-b), pode-se obter uma estrutura de coordenação inteligente sem intermediários, num formato mais horizontal onde os elementos interagem lateralmente. Nessa, as próprias empresas possuem os conhecimentos necessários para descobrirem quaisquer inconsistências.

A coordenação centralizada (hierárquica) se assemelha com o modelo de consciência imposto pelo Materialismo Cartesiano, muito debatido em Denett & Kinsbourne (1995). De acordo com esse modelo ortodoxo, onde quer que exista uma mente consciente, há um ponto de vista, um observador que toma as informações disponíveis e as coloca no universo. É o mesmo que a idéia de Descartes de um ponto central no cérebro ligando o cérebro (corpo) a consciência. Gilbert Ryle atacou essa dissociação entre os fatos físicos e mentais, chamando estes últimos de “o fantasma da máquina” [Ryle, 1949].

Nos dias de hoje, está claro que essa não é a solução para os problemas da mente (não existe nenhuma “ponte” centralizada). É um erro acreditar que o cérebro tenha qualquer quartel general, mas é possível modelá-lo, sem a intenção de solucionar os problemas da mente neste trabalho, como um quartel general em si, um local onde se encontra o observador definitivo.

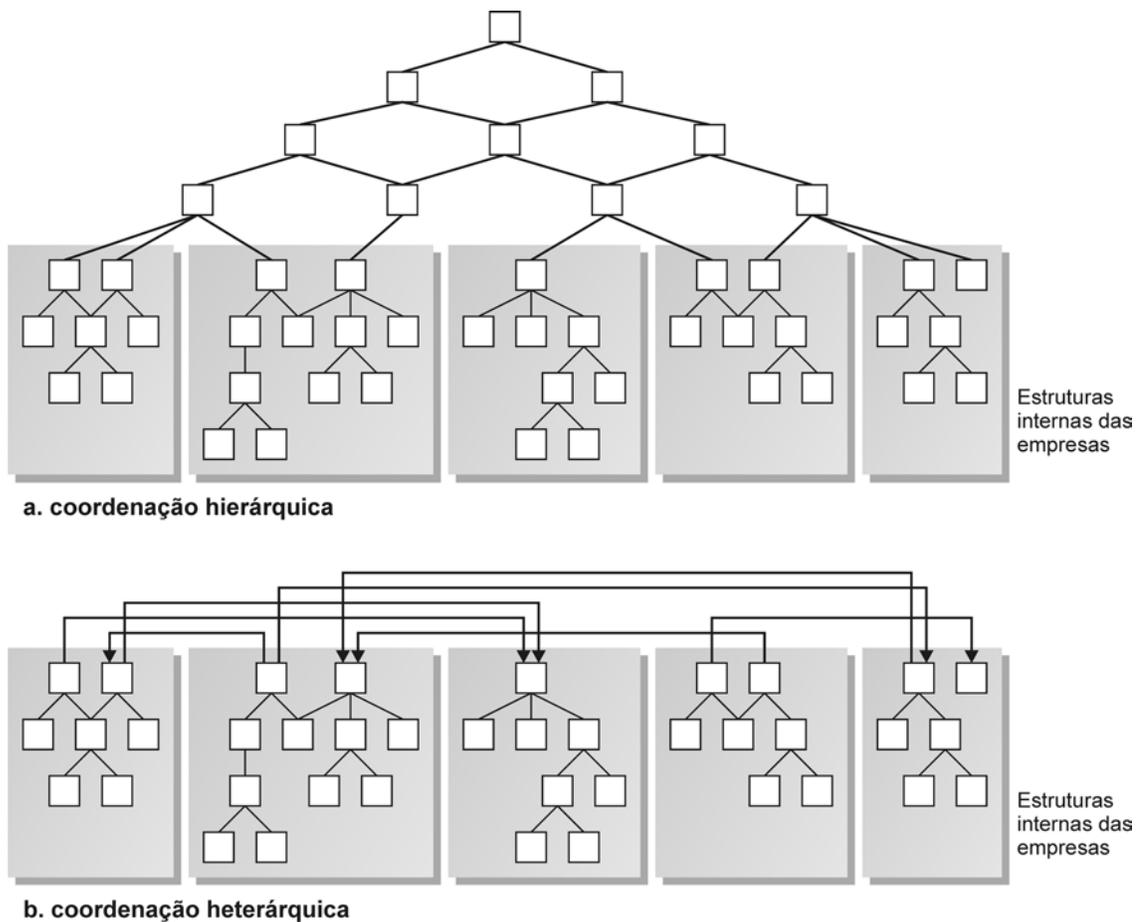


Figura 3.3: Estruturas para a coordenação de sistemas distribuídos [adaptado de Cuenca & Ossowski, 1999]

### *Cooperação no processo de planejamento*

Planejamento é essencial para o comportamento social de empresas que dividem o mesmo ambiente. Nas Empresas Virtuais, planejar significa o alcance de um sistema cooperativo através da coordenação de ações de cada empresa que realiza tarefas em processos de negócio distribuídos [Rabelo & Camarinha-Matos, 1996].

O planejamento distribuído em uma Empresa Virtual é um desafio, porque não apenas o processo de planejamento, mas também seus resultados são distribuídos. Como não há nenhum plano final representando a totalidade do problema, peças distribuídas devem se compatibilizadas, i.e., as empresas não devem entrar em conflito,

umas com as outras, quando executando seus planos. Ainda, essas devem se ajudar para a execução dos planos.

### *Negociação no processo de tomada de decisão*

A coordenação de empresas que dividem o mesmo ambiente e possuem objetivos diferentes é chamada de negociação. Nas Empresas Virtuais, negociar significa o acordo sobre uma decisão conjunta que é firmado entre duas ou mais empresas que possuem metas e objetivos próprios.

Existem inúmeras técnicas de negociação, podendo ser baseadas ou não na presença de um intermediário (*broker*). O mecanismo de negociação resultante deve seguir os seguintes atributos [Rosenschein & Zlotkin, 1994]:

Eficiência: os recursos utilizados no processo de negociação devem ser minimizados.

Estabilidade: não deve haver incentivos que desviem as decisões das estratégias acordadas.

Simplicidade: o processo de negociação deve demandar poucos esforços.

Distribuição: as decisões de toda organização não devem ser centralizadas em um único ponto.

Simetria: a conduta do mecanismo deve ser de imparcialidade, não podendo as decisões tender para uma determinada parte.

## **3.4 Holons e holarquias**

O paradigma holônico é fruto do trabalho do jornalista húngaro e ativista político Arthur Koestler. Uma de suas contribuições mais importantes é a análise de sistemas mentais e sociais através do conceito de holons e holarquias. Como uma forma de contraposição aos extremos do reducionismo proposto pela metodologia científica cartesiana e aos exageros do holismo, o qual pretende a hegemonia do todo sobre as partes em todas as circunstâncias, Koestler argumenta que uma organização, mental ou social, depende da existência de partes e todos para sobreviverem [Koestler, 1967].

A primeira conclusão em seu trabalho é que sistemas complexos são alcançados mais facilmente se compostos por formas intermediárias. Na verdade, Koestler (1967) atribui essa descoberta ao prêmio Nobel em Economia Herbert Simon e, inspirado por este diz em sua parábola dos dois relojoeiros:

*“Havia dois relojoeiros suíços, chamados Bios e Mekhos, que fabricavam relógios muito finos e caros. [...] Embora os relógios que fabricavam tivessem igualmente grande procura, Bios prosperava, ao passo que Mekhos lutava e apenas conseguia viver. Finalmente, Mekhos teve que fechar sua oficina e empregar-se como mecânico de Bios. Os habitantes da cidade discutiram durante muito tempo sobre as causas desse fato, e cada um tinha uma teoria diferente a apresentar, até que a verdadeira explicação transpareceu e se revelou ser ao mesmo tempo simples e surpreendente.*

*Os relógios consistiam de cerca de mil peças cada um, mas os dois rivais utilizavam métodos diferentes para montá-los. Mekhos montava seus relógios peça por peça, como se estivesse fazendo um piso de mosaicos de pedrinhas coloridas. E, assim, todas as vezes que ele era perturbado no seu trabalho e tinha que deixar de lado um relógio parcialmente montado, este se desfazia em fragmentos, e ele tinha que começar de novo tudo do princípio.*

*Bios, por outro lado, concebeu um método de fazer relógios construindo, de partida, subconjuntos de montagem, constantes de dez elementos, que ele reunia em uma unidade independente. Dez desses subconjuntos eram ajustados em um subsistema de ordem mais elevada, e dez desses subconjuntos constituíam o relógio completo.” [em Koestler, 1967]*

O método de Hora lhe dava duas grandes vantagens. Toda vez que a construção de um subconjunto tinha de ser interrompida, em vez de começar tudo de novo, ele remontava apenas aquele determinado subconjunto. Na pior das hipóteses, se a

perturbação ocorresse quando ele estivesse perto de acabar um subconjunto, deveria apenas repetir nove operações. Além disso, seu método levava a um produto acabado incomparavelmente mais resistente a qualquer avaria e muito mais fácil de consertar do que os instáveis mosaicos de parcelas atômicas de Tempus.

Com alguns cálculos, pode-se demonstrar que nenhuma existência da Terra poderia ser desenvolvida, a menos que Tempos se convertesse para o método de Hora, produzindo, assim, hierarquias de sistemas complexos a partir de subconjuntos mais simples [von Bertalanffy, 1965]. Ou seja, sistemas complexos se desenvolvem com muito mais rapidez, a partir de sistemas simples, se houver formas intermediárias instáveis.

A segunda conclusão de Koestler (1967) é que, embora partes e todos sejam facilmente identificados em qualquer sistema complexo, partes e todos não existem em seu senso absoluto em nenhum lugar. Assim, Koestler propõe a utilização da palavra “holon” (junção de *holos*, do grego todo, com o sufixo *on*, que, assim como em próton e nêutron, indica parte ou partícula) para descrever a natureza híbrida desses componentes. No holon, os todos são elementos holísticos autocontidos em relação a suas partes subordinadas e as partes atomistas são dependentes de níveis superiores.

Ainda, Koestler (1967) define holarquia como uma hierarquia de holons auto-regulados que funcionam como todos autônomos em supra-ordenação de suas partes e, ao mesmo tempo, como partes dependentes em subordinação de controles em níveis mais elevados e em coordenação com o ambiente local. Uma holarquia é uma estrutura auto-regulada, aberta tanto no topo quanto na base. O holon no nível superior, sendo um todo, pode ser parte de algum todo ainda maior. E o holon no nível inferior, sendo a parte mais elementar, pode conter componentes ainda menores.

Um exemplo de aplicação desses princípios em modernos sistemas de manufatura é a representação da Empresa Virtual mostrada na figura 3.4. Nessa, o holon de Empresa Virtual (HVE) é formado por vários holons de empresa (HE). Estes, por sua vez, possuem holons de recurso (HR). Esse sistema é dito aberto, uma vez que nem partes e nem todos podem ser identificados de forma absoluta. O holon de Empresa Virtual, o todo nesse ponto de vista, pode ser parte de um holon maior

formado pelas empresas compradoras de matéria-prima de uma outra empresa, uma vez que, competindo em um mercado, está inserido em um ambiente onde se encontram holons de outras empresas. Ainda, imaginando que um holon de recurso possa ser um torno CNC, esse é, então, formado por holons de ferramentas e holons de dispositivos de fixação.

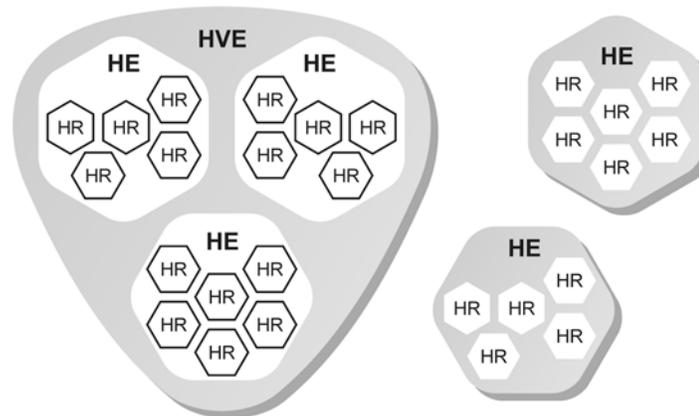


Figura 3.4: Exemplo de empresa virtual organizada holonicamente [adaptado de Koestler, 1967]

### 3.4.1 O efeito Janus

Tradicionalmente, um indivíduo é definido como uma unidade indivisível e auto-abrangente, com uma existência separada e independente. No entanto, esse sentido absoluto não é encontrado em nenhum lugar: há também que se considerar a cooperação e a interdependência. Koestler (1967) chamou essa propriedade de efeito Janus, deus que, segundo a mitologia romana, possuía duas faces olhando para direções opostas. A face voltada para os níveis subordinados representa o todo completo, enquanto que a face voltada para cima é a de uma parte dependente.

O efeito Janus é parte fundamental da essência dos elementos de qualquer holarquia, dando aos holons duas características básicas:

Autonomia: natureza auto-assertiva que fornece ao holon a estabilidade necessária para atuar por si mesmo, principalmente no caso de circunstâncias não previsíveis.

Cooperação: natureza integrativa que faz com que os holons cooperarem entre si, transformando todo holon em componente de um todo maior.

A natureza auto-afirmativa é a expressão dinâmica da condição de todo do holon, a qual pode ser encontrada na competição de plantas por água, solo e luz, de predadores por presas e indivíduos da mesma espécie pelo acasalamento. Já a natureza integrativa é sua condição de parte, que explica fenômenos como a simbiose entre plantas e animais.

Diz-se que um holon está em equilíbrio dinâmico se suas naturezas auto-afirmativas e integrativas estão balanceadas. Uma vez que os holons realizam constantes transações, estados de discordância podem ser atingidos. Mas esses são transitórios, parte necessária do processo, devendo o estado de equilíbrio retornar tão logo suas operações se encerrarem. Mas se o ponto equilíbrio for estressado acima de um limite, o equilíbrio pode ficar comprometido.

No contexto da Empresa Virtual, esse princípio do paradigma holônico se refere à associação de empresas, indivíduos autônomos que se juntam e cooperam mutuamente para que melhores performances sejam obtidas. Ao mesmo tempo em que uma empresa possui características auto-assertivas, interesses como sua realização de lucros, essa deve ser integrativa em sua colaboração para o alcance dos objetivos da Empresa Virtual.

### *3.4.2 Dissecabilidade*

Cada estrutura complexa da vida social pode ser dissecada em sua variedade de arcabouços hierárquicos. Assim, sociedades podem ser estruturadas em vários tipos de hierarquias, entrelaçadas de acordo com as diversas coesões sociais existentes entre essas.

Embora a representação de uma sociedade seja uma tarefa extremamente complexa, cada aspecto pode ser modelado em uma ou mais hierarquias separadas. Um holon pode participar de diferentes sociedades, pertencendo a várias hierarquias. Enquanto empregado de uma empresa, o operador de uma máquina está subordinado a seu chefe. Mas esse mesmo operador pode presidir uma associação da qual seu

chefe também faz parte. Indo ao supermercado, ele pode, ainda, interagir com empregados que fazem parte de outras hierarquias.

O mesmo ocorre com empresas que podem fazer parte de diferentes Empresas Virtuais, assumindo, em cada uma, diferentes funções. Nessa situação, seus recursos devem se re-estruturar de acordo com as especificidades de cada ambiente virtual. Em um contexto, um centro de usinagem pode ser um todo elevado na hierarquia das máquinas, uma vez que, sozinho, é capaz de realizar todas as operações produtivas de seu produto. Em outro, esse mesmo centro de usinagem passa a ser apenas uma parte de um conjunto de várias máquinas que realizam desde uma conformação plástica até o acabamento final do produto.

O número de níveis que uma hierarquia compreende determina se essa é superficial ou profunda, enquanto que o número de holons em cada nível determina sua extensão [Simon, 1962]. No entanto, para um determinado escopo de análise, o número de níveis e subestruturas que um sistema possui pode crescer indefinidamente.

### *3.4.3 Regras fixas e estratégias flexíveis*

Qualquer que seja a natureza de uma organização hierárquica, a essência de seus componentes possui um aspecto fixo e outro variável. O primeiro é determinado por um conjunto de regras físicas, as quais lhe impõe um padrão característico; o segundo, associado à flexibilidade, ocorre através de escolhas entre alternativas permitidas.

Holons são governados por um cânone de regras fixas e mostram mais ou menos estratégias flexíveis, de acordo com sua posição na hierarquia [Koestler, 1967]. As regras determinam suas propriedades constantes, sua configuração e padrões funcionais, características mais acentuadas nos níveis mais baixos (operacionais) da estrutura. As estratégias são regidas pelos desejos do próprio holon, as quais decidem a direção a ser tomada, encontrando-se nos níveis mais elevados (estratégicos).

Assim, rigidez e flexibilidade são extremos opostos de uma estrutura hierárquica. Isso equivale à hierarquia de planejamento de uma organização. Seja essa virtual ou tradicional, cabe aos níveis executivos, seu conselho societário e suas diretorias,

tomarem as decisões estratégicas. Essas decisões vão então descendo pela estrutura através da definição de restrições, condições de contorno a serem seguidas.

É importante destacar que será esse modelo de regras e estratégias que determinará o comportamento de um holon, sendo, desse modo, responsável direto por seu equilíbrio dinâmico. De acordo com o conceito de holon agressivo [Koestler, 1967], componentes do sistema podem exagerar na imposição de restrições, o que leva a uma redução na capacidade do sistema devido ao atendimento das regras em excesso. É um caso de auto-afirmação agressiva de componentes imaturos do sistema.

#### *3.4.4 Filtros e gatilhos*

Estruturas hierárquicas devem possuir sistemas de comunicação eficazes para que informações obtidas pelos níveis hierárquicos mais baixos sejam transmitidas para seus níveis hierarquicamente superiores, onde ocorre o processo de tomada de decisão. Uma vez processadas, e tendo sido selecionado um conjunto de ações cabíveis, essas informações voltam para os níveis mais baixos da estrutura hierárquica, onde as ações serão executadas [Koestler, 1967].

Para lidar com uma grande quantidade de entradas e saídas, gerando ações em tempo hábil, hierarquias utilizam um mecanismo hierárquico de abstração.

Hierarquias de saída trabalham em um princípio de gatilho: sinais (implícitos ou codificados) gerados em níveis mais elevados liberam mecanismos engatilhados nos níveis mais baixos. Já as hierarquias de entrada trabalham em um princípio inverso. Ao invés de gatilhos, essas utilizam filtros para levar os sinais até o nível correto. Subindo a estrutura nível a nível, o sinal pára quando um holon com responsabilidade suficiente para tomar a decisão é encontrado.

Esse mecanismo se assemelha aos encontrados em alguns sistemas de suporte a decisão (DSS), os quais são responsáveis pelas decisões de controle adequadas para maximizar a eficiência do sistema e minimizar os impactos negativos resultados de falhas nesse processo [Ossowski et al., 2002]. Esses sistemas adquirem dados sobre o estado sistema e seu ambiente externo através de monitores inteligentes que avisam os controladores adequados sobre eventuais alterações indesejadas. Sempre que

necessário, esses controladores enviam informações reparadoras que, sendo efetuadas pelos níveis funcionais adequados, trazem o sistema de volta para seu caminho correto.

### *3.4.5 Mecanização e liberdade*

Holons em níveis mais elevados de uma hierarquia apresentam padrões de atividades mais complexos e estocásticos, enquanto aqueles nos níveis mais baixos são mais mecanizados, estereotipados e previsíveis. Mas, sem considerar qual é o mais apto, o nível no qual a decisão sobre uma certa ação será tomada depende da natureza da situação [Koestler, 1967].

Esses dois comportamentos, liberdades e mecanizações, são importantes (e vitais) em qualquer hierarquia. Mesmo as ações automáticas, que podem levar em seus casos mais extremos ao formalista rígido, possuem seus pontos positivos por se transformarem no princípio da parcimônia: a menor ação [Koestler, 1967]. Ser capaz de acertar a tecla certa no computador por puro reflexo é algo extremamente útil.

Os reflexos locais são os últimos a fazerem seu aparecimento no desenvolvimento de um sistema nervoso. Isso ocorre porque esses são influenciados pelos níveis mais elevados da hierarquia: através da prática, as atividades tendem a se tornarem rotinas automatizadas. Esse processo pode ser descrito como a contínua transformação das atividades mentais em mecânicas. Quando as coisas são iguais, a monotonia do ambiente facilita a mecanização (figura 3.5).

Aos níveis mais elevados da hierarquia cabem, então, as decisões sobre situações novas ou inesperadas. Cada passo dado para cima, é refletido numa atividade mais vívida e precisa. Como a variedade de alternativas aumenta com a complexidade dos níveis mais elevados, esse passo é, ainda, acompanhado pela experiência subjetiva na liberdade da decisão.

Nos níveis mais baixos, cada holon deve estar equipado com dispositivos auto-reguladores para a execução de suas atividades. Suas operações, guiadas de acordo com seu cânone de regras fixas, devem estar adequadas com os objetivos do sistema e com seu ambiente [Koestler, 1967]. As propriedades auto-reguladoras devem manter uma certa estabilidade, re-direcionando constantemente o sistema no sentido de seus

objetivos. É o equivalente ao princípio de re-alimentação de Norbet Wiener, a partir do qual foi criado o termo “cibernética” (do grego, *cybernitos*, que significa timoneiro) [Wiener, 1965].

Numa organização, mecanizações e liberdades são equivalentes às decisões tomadas em sua hierarquia de planejamento. Nos níveis inferiores estão as operações, caracterizadas por dados determinísticos como tempo de ciclo, nível de inventário e custo operacional, sendo suas ações basicamente ditadas por orientações de trabalho. Já nos níveis superiores, decisões estratégicas devem ser tomadas considerando-se hipóteses de conjunturas políticas, crescimento econômico e previsões de mercado em longo prazo. Mecanismos de controle baseados no monitoramento de medidas de desempenho garantem que cada ação esteja de acordo com as diretrizes estratégicas da organização.

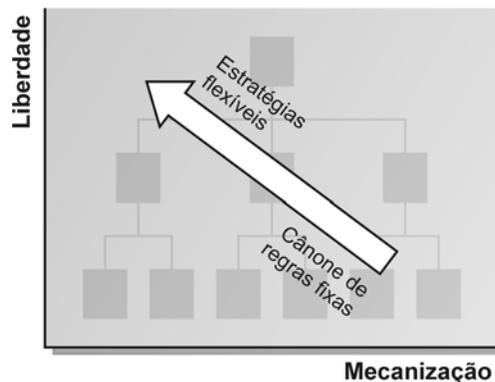


Figura 3.5: Níveis de liberdade e mecanização [adaptado de Franco & Batocchio, 2000]

### 3.4.6 Degeneração e regeneração

Desafios em ambientes variáveis só podem ser executados através de comportamentos flexíveis: as estratégias variáveis que fornecem a presteza necessária para se explorar oportunidades favoráveis. No entanto, o desafio pode exceder limites críticos, de modo que esse não possa ser mais executado pelas habilidades dessa organização. Diante dessa possibilidade, uma dessas situações pode ocorrer [Koestler, 1967]:

Degeneração: pode haver a estagnação ou até mesmo a extinção da organização. No curso da evolução natural, isso tem ocorrido muitas e muitas vezes: para cada espécie sobrevivente, há outras cem que falharam no teste.

Regeneração: a re-organização da estrutura e de seu comportamento, levando a um passo rumo ao progresso do sistema.

O potencial regenerativo de um sistema se manifesta em flutuações de níveis mais elevados de integração para níveis mais primitivos, subindo novamente para um padrão novo e modificado. Isso pode significar que novas oportunidades de negócio em uma Empresa Virtual podem levar a busca de novas competências chave através da substituição de algumas empresas. Uma vez re-estruturado um nível mais baixo dessa hierarquia, novas habilidades são conferidas a Empresa Virtual como um todo.

### **3.5 Aplicando o paradigma holônico**

Conforme discutido na introdução desta tese, chamar qualquer sistema que não seja humano de inteligente é uma licença poética dada pela Postura Intencional. Tratando-se uma organização social como se essa fosse um agente racional e autônomo, cria-se meios para interpretar seu comportamento.

É apoiado nessa abordagem que este trabalho se desenvolve.

Assim, as seções seguintes procuram mostrar a funcionalidade da aplicação do paradigma holônico, adotando dois modelos aparentemente díspares como objetos de estudo: o mecanismo humano de consciência dividida e reflexo e as atividades de programação e controle da produção.

No entanto, é justamente na busca de similaridades diante das diferenças entre os dois (e outros) modelos que se espera encontrar respostas para os problemas aqui propostos. Dada a complexidade de um Sistema Inteligente de Manufatura, essa abordagem se torna conveniente. É criando paralelos com relações de maior discernimento que se espera inferir novas soluções.

### 3.5.1 Hierarquização de hábitos e improvisações

Assim como a matéria, com sua hierarquia de níveis macroscópicos, moleculares, atômicos e subatômicos, não pode ser considerada um conceito unitário, a mente não pode ser identificada apenas como percepções, pensamentos e sentimentos conscientes. Há uma série ascendente de níveis, partindo das relações automáticas (mecanizações) e semi-automáticas, e não havendo um teto [Farthing, 1992].

Todas as tarefas instintivas consistem de hierarquias de subabilidades, as quais são controladas por regras fixas e guiadas por estratégias flexíveis, sendo estas últimas adaptáveis a condições inesperadas. Os hábitos são holons cujo comportamento é governado por regras que, em sua maior parte, opera-se de forma inconsciente. Além disso, cada holon possui uma certa margem de opções estratégicas, marcados pela consciência, as quais levam uma elevada capacidade de improvisação.

Uma mesma e única atividade pode, de acordo com as circunstâncias, ser efetuada automaticamente, sem ciência consciente de nossas próprias ações, ou ser acompanhada por graus variáveis de consciência. Um exemplo clássico desse princípio são as ações de um motorista de automóvel, o qual ilustra essa mudança de nível hierárquico de acordo com a complexidade da decisão a ser tomada [Koestler, 1967]:

*“A direção de um carro é uma rotina que inclui, entre suas ‘regras do jogo’, o pisar no pedal do freio quando há um obstáculo à frente. Entretanto, numa estrada gelada, frear pode ser um negócio arriscado, pois o volante não obedece do mesmo modo, e toda a estratégia da direção tem de ser alterada, transposta para um tom diferente, por assim dizer. Após certo tempo, isso também pode tornar-se uma rotina automática, mas deixe-se um cãozinho atravessar trotando a estrada congelada, na frente do motorista, e este terá de tomar uma ‘decisão de alto nível’: meter o pé no freio, arriscando a segurança de seus passageiros, ou atropelar o cão. E se, em vez de um cão, o transeunte imprudente for uma criança, ele provavelmente apelará para o freio, seja qual for o resultado. É nesse nível, quando os prós e os contras se acham*

*igualmente balanceados, que a experiência subjetiva da liberdade e da responsabilidade moral surge.” [Koestler, 1967]*

Aprender a dirigir requer intensa concentração para coordenar ações como a mudança de marchas, a direção e a frenagem. Mas, com a repetição desses movimentos, o motorista as automatiza, fazendo com que, em situações normais, seu lado consciente esteja ligado à visão e audição para poder prestar mais atenção nos eventos que ocorrem a sua volta.

É nos níveis mais baixos que estão os hábitos sensório-motores, como os utilizados ao se dirigir um veículo, mas, se um objeto atravessa a estrada, um nível hierárquico superior é acionado. Sendo esse objeto um cachorro, e estando a estrada escorregadia, a complexidade da decisão aumenta, levando-a para um ponto ainda mais elevado na hierarquia. Percebendo que se trata de uma criança, e não um cachorro, o nível da responsabilidade moral, o super ego, intervém, acionando o freio independentemente da reação do automóvel.

Discussões sobre a natureza da experiência consciente e as funções da consciência podem ser encontradas em diversos trabalhos científicos da Psicologia. Embora esta tese não trate especificamente dessas questões, seu estudo mostra princípios fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de manufatura inteligentes.

### ***3.5.2 Programação de atividades da produção***

A programação da produção está relacionada à hierarquia estratégica, devendo seguir as definições dos objetivos da empresa. Suas decisões de entrega de produtos e formação de estoques devem considerar os padrões que a empresa segue para flexibilidade, custos e confiabilidade de entrega.

Elemento mais baixo nessa hierarquia, o seqüenciamento das atividades de produção (*scheduling*) é um problema de planejamento operacional. É um processo de tomada de decisões logísticas que envolvem a distribuição planejada de diversas tarefas no tempo para os diferentes recursos disponíveis, fazendo com que pontos

ótimos de operação sejam alcançados (e.g. o tempo de ciclo médio das tarefas pode ser minimizado).

Um problema pode ser imaginado: várias tarefas alimentam um sistema produtivo de acordo com uma dada frequência, sendo que, para essas tarefas, recursos devem ser alocados. Trata-se de um problema que, tradicionalmente, pode ser solucionado a partir de um ambiente previsível e controlável, onde arquiteturas hierárquicas ou, de forma ágil e autônoma, arquiteturas heterárquicas de controle podem ser aplicadas. A questão é examinar como o sistema se comporta diante desses diferentes cenários, sobretudo se perturbações forem impostas. Para isso, define-se um tipo especial de tarefa, possuindo certa urgência, para a qual é atribuída uma maior prioridade. O problema se torna, assim, a capacidade de re-configuração do sistema e sua habilidade em lidar com diferentes situações.

Em uma estrutura hierárquica típica, existe a figura de um programador centralizado, nas mãos do qual fica a responsabilidade de ordenar as tarefas de forma a maximizar o desempenho do sistema como um todo. Essas tarefas, conforme as definições do programador, são, então, seguidas seqüencialmente pelos recursos.

Essa figura do programador leva a idéia de sistemas onde a capacidade de processamento é um atributo crítico, uma vez que lidam com uma grande quantidade de informações. O número de possíveis soluções é função do número de tarefas e número de recursos, devendo ser utilizados algoritmos sofisticados para a seleção da mais adequada. E é justamente o fato da capacidade de processamento ser proporcional a complexidade na centralização do controle, que faz com que sua agilidade seja comprometida. O tratamento das tarefas especiais, com aquela exigência de prioridade, leva a necessidade de se recalcular todo o plano, o que pode não ocorrer em tempo hábil.

Já em uma estrutura heterárquica, esse mesmo sistema deve seguir apenas as ordens de produção, ignorando qualquer outro programa como o seqüenciamento indicado pelo programador. Cada recurso controla suas próprias atividades de produção de forma independente de modo a aumentar sua eficiência isoladamente. É um sistema extremamente simples; autônomo mas não cooperativo.

Esse é um sistema ágil, o qual trata ocorrências imprevisíveis, como aquelas tarefas prioritárias, de maneira rápida, já que apenas planos locais, relacionados com suas próprias atividades, devem ser refeitos (e não os planos de todo o sistema). No entanto, é um sistema que negligencia a eficiência do sistema global: a somatória do máximo global não é igual à somatória dos máximos locais [Goldratt, 1990].

Apoiando-se no modelo apresentado para o mecanismo humano de consciência dividida e reflexo, pode-se criar uma nova visão para a solução desse problema: a programação holônica das atividades de produção. É o ponto de vista de uma estrutura de planejamento baseada numa holarquia.

Nessa estrutura holárquica, o sistema coopera com o programador centralizado. Cada recurso considera a programação definida por este como uma sugestão, a qual deverá ser seguida em situações normais. No entanto, quando a programação sugerida se torna inviável, como no caso de paradas das máquinas ou com o surgimento daquela tarefa prioritária, cada recurso, como que assumindo uma postura mais consciente, autonomamente adapta sua programação à situação encontrada. A programação adaptada é executada e o estado do sistema retornado ao programador para que esse, no processamento de novas tarefas, possa partir da situação real.

Esse é um sistema autônomo e cooperativo. É uma solução que explora os principais benefícios de otimização das arquiteturas hierárquicas (integrativas) e a agilidade das arquiteturas heterárquicas (auto-assertivas).

Esse exemplo mostra, ainda, como conflitos podem ser solucionados caminhando-se verticalmente na estrutura do sistema. Se uma situação não pode ser corretamente atendida por uma decisão mecanizada, um nível superior, mais flexível e consciente é buscado.

E é justamente na aliança entre autonomia, cooperação e organização que se desenvolve esta tese.

## Capítulo 4

# Requisitos Tecnológicos

*A Inteligência Artificial Distribuída (DAI) foi escolhida como a base tecnológica desta tese. Apresentando muitas vantagens em sua utilização, o estudo, a investigação e a aplicação de seus conceitos foram fundamentais para que o alcance de seus objetivos fosse bem sucedido. É o fechamento da trilogia organização, sistemas naturais e tecnologia apresentada no começo deste trabalho como importante fonte de inspiração para os desenvolvimentos realizados.*

*Este capítulo mostrará, inicialmente, a Inteligência Artificial, base de conhecimento para as implementações dos desenvolvimentos desta tese. Ênfase especial será dada a agentes inteligentes e Sistemas Multiagentes, mostrando seus conceitos e principais aplicações. Em seguida, corroborando a aplicação específica do paradigma holônico, três importantes desenvolvimentos serão mostrados: um sistema de informação para pequenas e médias empresas, a arquitetura de referência PROSA para controle da manufatura e a arquitetura para sistemas executivos HoloBloc.*

### 4.1 Inteligência artificial

*“Inteligência artificial é o estudo de conceitos que permitem ao computador perceber, raciocinar e agir.” [Winston, 1992]*

Assim começa o livro fundamental “*Artificial Intelligence*” de Patrick H. Winston. Desde que esse termo foi cunhado na notória conferência ocorrida em Dartmouth em 1958, a Inteligência Artificial (IA) vem sendo uma crescente área da Ciência da Computação [Winston, 1992].

Alan Turing previu esse desenvolvimento ainda em 1950 [Turing, 1950]. No entanto, a verdade é que existem muitas questões a serem respondidas antes de se tentar chegar a um modelo ideal para Inteligência Artificial. Chega-se no século XXI e, mesmo com os exponenciais avanços tecnológicos, nenhuma máquina conseguiu

passar consistentemente pelo Teste de Turing. Alguns computadores devidamente programados conseguem emular situações analisadas em versões simplificadas do teste, mas sempre esteve ausente o atributo mental do discernimento.

Independentemente das ambições almejadas, a aplicação dos conceitos da IA são fundamentais para os modernos sistemas de manufatura.

Na robótica, isso se reflete em máquinas mais autônomas, capazes de executar tarefas antes possíveis apenas para agentes humanos dotados da habilidade necessária. Sistemas especialistas se tornam cada vez mais úteis em seu uso, apoiando tomadas de decisão e sugerindo as alternativas mais viáveis para deixar para o homem o uso do bom senso. Complexos modelos matemáticos otimizam o planejamento de cadeias de suprimentos, encontrando, dentro de uma enorme rede, um ponto de equilíbrio entre tempo de reposição (*lead time*) e custo de armazenagem.

A questão é que ainda existem muitas questões a serem respondidas antes que surja um modelo ideal de Inteligência Artificial. Hoje, as ferramentas, os recursos e as informações disponíveis estão, sem dúvidas, convergindo numa nova era para a aplicação da Inteligência Artificial nos sistemas de manufatura. A evolução mostra, assim, que chega cada vez mais perto o momento de se tratar as barreiras existentes de forma decisiva. Tal qual as contribuições almejadas por esta tese, cabe aos pesquisadores aprenderem com as experiências realizadas e trabalharem no seu desenvolvimento.

#### *4.1.1 Agentes inteligentes*

Uma abordagem contemporânea para o desenvolvimento de sistemas baseados em Inteligência Artificial diz respeito a agentes inteligentes (figura 4.1).

*“Um agente é um sistema computacional [como um programa de computador ou um robô] situado em determinado ambiente, o qual é capaz de executar ações autônomas nesse ambiente para alcançar seus objetivos de projeto.” [Wooldridge & Jennings, 1995]*

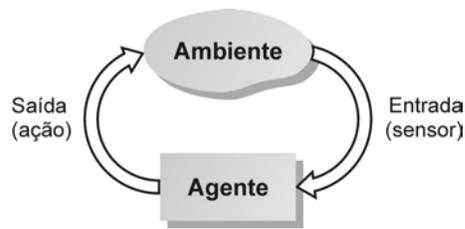


Figura 4.1: Visão sistêmica de agente

Mas nem todo agente, seja esse um programa de computador ou um robô, pode ser dito inteligente. Para tanto, um agente precisa demonstrar as seguintes propriedades [Wooldridge & Jennings, 1995]:

Autonomia: agentes executam a maior parte de suas ações sem interferência direta de agentes humanos ou de outros agentes computacionais, possuindo controle total sobre suas ações e estado interno.

Capacidade de reação: agentes são capazes de perceber e reagir a alterações em seu ambiente, dando as devidas respostas em tempo hábil para que seus objetivos sejam satisfeitos.

Capacidade pró-ativa: agentes são capazes de apresentar um comportamento orientado a objetivos, tomando iniciativas, quando julgarem apropriado, para satisfazerem seus objetivos.

Habilidade social: agentes inteligentes são capazes de interagir com outros agentes (humanos ou computacionais), para satisfazerem seus objetivos ou, ainda, para auxiliarem outros agentes.

O comportamento de um agente inteligente pode ser baseado tanto em sua experiência própria, quanto no conhecimento usado em sua construção para um ambiente em particular. No caso em que as ações de um agente se baseiam exclusivamente nesse conhecimento embutido através de seu projeto, ao ponto que esse sequer considere suas percepções, diz-se que o agente tem falta de autonomia e, portanto, não se torna inteligente.

O conceito de autonomia é fundamental para a definição de agente inteligente. Seu comportamento deve depender, pelo menos parcialmente, de sua própria

experiência, sendo, assim, capaz de agir por seus próprios objetivos sem a intervenção de outrem: um agente inteligente possui controle tanto sobre o ambiente onde se insere, quanto sobre seu próprio estado. Para ser inteligente, o agente deve possuir um certo grau de autonomia, o que o torna capaz de sobreviver em um ambiente dinâmico.

#### 4.1.2 *Sistemas Multiagentes*

Por impossibilidade de resolução, ou por outro tipo de conveniência, um agente pode interagir com outros agentes na busca das melhores soluções para certos problemas. A Inteligência Artificial Distribuída (DAI) trata justamente da utilização de técnicas de Inteligência Artificial para a solução de problemas distribuídos, podendo ser assim definida:

*“Inteligência Artificial Distribuída é o estudo, construção e aplicação de Sistemas Multiagentes, i.e., sistemas nos quais agentes interativos e inteligentes perseguem algum conjunto de metas ou realizam algum conjunto de tarefas.” [Weiss, 1999]*

Iniciativas de se construir soluções a partir da distribuição de problemas não são novas [Decker, 1987]. Chandrasekaran (1981) apontava para metáforas de sistemas naturais e sociais para mostrar a importância estratégica dessa abordagem. Antes ainda, em Erman & Lesser (1977), um sistema computacional para esse fim, o Hearsay-II, era apresentado. Os conceitos evoluíram e Durfee et al. (1989) já apontavam para a cooperação como aspecto chave.

Soluções de uma maneira distribuída muitas vezes são uma extensão natural do problema em si: algumas estruturas já sugerem, enquanto característica própria, uma divisão inicial. Ainda, se um problema pode ser dividido em partes, soluções podem ser encontradas de maneira mais rápida, solucionando as partes em paralelo, e robusta, desenvolvendo-se a partir de partes mais simples e seguras.

Mas cada subproblema pode ser insolúvel se tratado isoladamente, dificultando a combinação das soluções independentes. O processamento distribuído leva, então, ao

problema de coordenação da rede de agentes, os quais, agindo em cooperação, podem chegar à solução almejada.

Para isso, os agentes devem existir e operar em um determinado ambiente, o qual, tipicamente, é computacional e físico. A quantidade de agentes interagindo nesse ambiente pode levar o sistema a ser tratado coletivamente, i.e., como uma sociedade de agentes.

A melhor maneira de se caracterizar e projetar sistemas computacionais distribuídos é através de Sistemas Multiagentes (MAS), cuja essência pode ser descrita em três pontos fundamentais [Huhns & Stephens, 1999]:

- Sistemas multiagentes fornecem uma infraestrutura que especifica a comunicação e os protocolos de interação.
- Sistemas multiagentes são tipicamente abertos e descentralizados.
- Sistemas multiagentes contêm agentes autônomos e distribuídos, os quais podem ou não ser cooperativos.

Um ambiente multiagente inclui, ainda, uma série de características, tais quais as enumeradas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características de ambientes multiagentes [Huhns & Stephens, 1999]

<b>Propriedade</b>	<b>Intervalo de valores</b>
<i>Autonomia de Projeto</i>	<i>Plataforma / Protocolo de Interação / Linguagem / Arquitetura Interna</i>
<i>Infraestrutura de Comunicação</i>	<i>Memória compartilhada ou Ponto-a-ponto Multicast ou Broadcast Puxada ou Empurrada Síncrona ou Assíncrona</i>
<i>Serviço de Diretório</i>	<i>Páginas brancas, Páginas amarelas</i>
<i>Protocolo de Mensagem</i>	<i>KQML HTTP ou HTML OLE, CORBA, DSOM, (XML)</i>
<i>Serviços de Mediação</i>	<i>Baseado em ontologia? Transação?</i>
<i>Serviços de Segurança</i>	<i>Timestamps / Autenticação</i>
<i>Serviço de Remessa</i>	<i>Cobrança / Circulação</i>
<i>Suporte a Operações</i>	<i>Arquivamento / Redundância / Restauração / Contabilidade</i>

Sistemas Multiagentes podem se diferenciar tanto em relação ao número de agentes, aos meios de comunicação e aos protocolos utilizados, quanto na maneira como esses se organizam e coordenam suas atividades. Em relação a suas aplicações industriais, agentes são melhor aplicados em sistemas que sejam [Parunak, 1998]:

Modulares: agentes compartilham os benefícios de modularidade herdados dos objetos. Sistemas Multiagentes são, assim, uma abordagem singular para processos industriais que podem ser particionados em subconjuntos cujas variáveis de estado são distintas daquelas de seu ambiente e cujas interfaces com esse ambiente possam ser claramente identificadas.

Descentralizados: agentes são objetos pró-ativos, i.e., capazes de monitorarem autonomamente seu ambiente e executarem as ações necessárias. Assim, Sistemas Multiagentes se enquadram nas estratégias de modernos sistemas de manufatura, como Empresas Virtuais, onde níveis excessivos de gerência são eliminados e decisões autônomas são levadas até níveis mais baixos.

Dinâmicos: a modularidade e a descentralização de Sistemas Multiagentes levam a vantagens sobretudo se o sistema sofre constantes mudanças. Enquanto a modularidade permite que o sistema possa ser parcialmente modificado, a descentralização minimiza o impacto de mudanças em parte isoladas no comportamento de outros módulos (figura 4.2). Para a indústria, essa capacidade de mudar freqüentemente, rapidamente e sem grandes efeitos colaterais leva a um considerável ganho de competitividade.

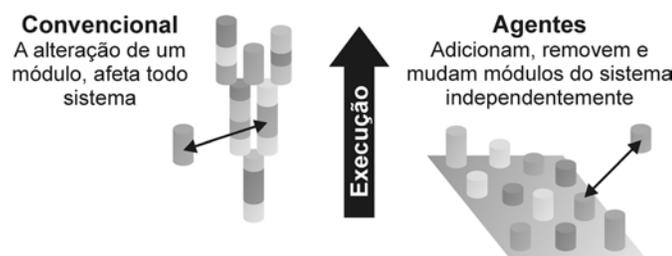


Figura 4.2: Modularidade e descentralização provendo mutabilidade [Parunak, 1998]

Não estruturados: agentes são projetados para interagir com o ambiente, e não com outros agentes em específico. Isso faz com que sua arquitetura não precise considerar todas as interações existentes entre cada tipo específico de agente. Isso faz com que os Sistemas Multiagentes se enquadrem em situações onde nem toda informação estrutural necessária está disponível quando um sistema é projetado, como acontece em muitas aplicações industriais.

Complexos: arquiteturas de agentes podem substituir a codificação explícita de um grande número de interações pela sua geração durante sua execução. Com isso, os efeitos da complexidade de sistemas, a qual pode crescer exponencialmente em relação a seu número de elementos, podem ser minimizados.

Agentes podem ser utilizados para suportar tarefas em qualquer fase do ciclo de vida de sistemas industriais. Nos itens a seguir, apresentam-se alguns projetos onde a tecnologia de agentes vem apoiando o desenvolvimento industrial.

#### *AARIA (Autonomous Architecture at Rock Island Arsenal)*

As pressões do ambiente direcionam cada vez mais para a formação de Empresas Virtuais. A Manufatura Baseada na Internet diz respeito à construção de ambientes cooperativos, conectando diversos sistemas de manufatura através da Internet para formar uma Empresa Virtual.

Para isso, foi criado o projeto AARIA (*Autonomous Agents at Rock Island Arsenal*), visando responder como a Internet e suas tecnologias podem alterar o futuro da manufatura [Parunak et al., 1998]. Seus objetivos são:

1. Mostrar como uma corporação pode empregar as tecnologias da Internet para utilizar seus recursos com maior eficácia enquanto enfrenta as pressões de distribuição, agilidade e customização.
2. Mostrar como parceiros já estabelecidos podem melhor utilizar os recursos compartilhados para poder formar empresas virtuais altamente ágeis para enfrentar essas pressões de manufatura.

O AARIA adota uma arquitetura baseada numa metodologia própria de partição de seus elementos, a qual levou ao desenvolvimento da estrutura mostrada na figura 4.3.

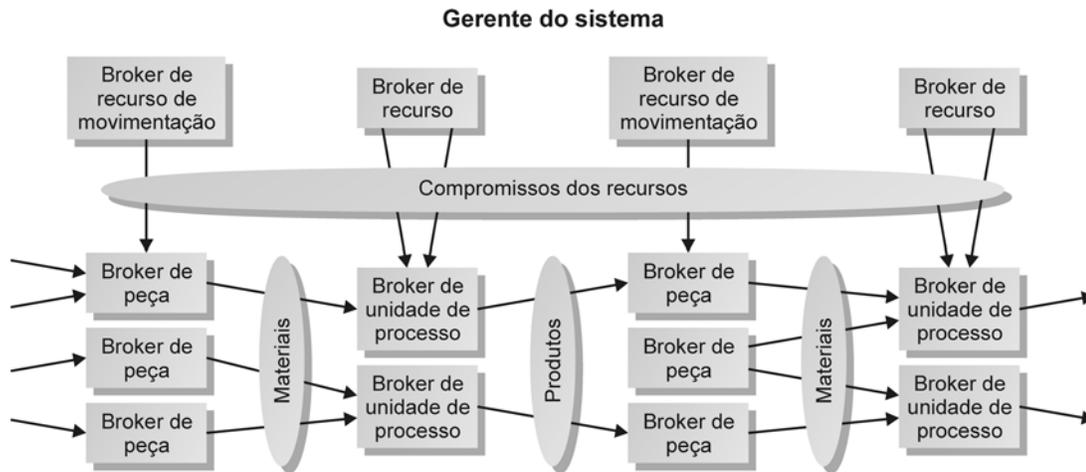


Figura 4.3: A arquitetura AARIA [Parunak et al., 1999]

Seus elementos principais são os facilitadores (*brokers*) de recurso, mediadores de peças e facilitadores de unidade de processo. Esses três tipos de elementos negociam entre si e entre seus consumidores ao longo do eixo de possíveis transações considerando diferentes aspectos de produção como custo, qualidade, tempo de entrega, características do produto e tempo de resposta. Através de protocolos de negociação baseados em redes de contrato [Smith, 1980], cada elemento dentro da cadeia de suprimento que se forma estabelece e mantém compromissos em relação a seus papéis e compromissos na rede. Uma vez que todo esse processo é executado por sistemas computacionais, essa estrutura provê um sistema de manufatura autonomamente re-configurável.

### *Outras aplicações industriais*

Uma das aplicações bem sucedidas de Sistemas Multiagentes na indústria é o projeto Metamorph II da *University of Calgary* do Canadá.

Sua origem é o projeto Metamorph, uma arquitetura para manufatura inteligente desenvolvida para fornecer adaptação em quatro níveis fundamentais: empresas virtuais, sistemas inteligentes distribuídos, engenharia simultânea e arquitetura de agentes [Maturana et al., 1999]. A MetaMorph inclui agentes de planejamento, controle e aplicação que se interagem para atingir objetivos locais e globais. Agrupamentos virtuais de agentes são dinamicamente criados, modificados e excluídos conforme as necessidades dos planejamentos colaborativos e a execução das tarefas. Agentes mediadores coordenam as atividades dentro de cada agrupamento e entre esses. Mecanismos de aprendizagem são incorporados para criar um processo de desenvolvimento de conhecimento.

O MetaMorph II é uma evolução da arquitetura MetaMorph na qual se busca integrar as atividades de empresas de manufatura como projeto, planejamento, programação, simulação e execução com aquelas de seus fornecedores, clientes e parceiros de um ambiente distribuído e aberto [Shen et al., 1998]. Para isso, o sistema de manufatura é organizado através de mediadores (figura 4.4). Cada subsistema está integrado ao sistema através de um mediador especial, podendo esse subsistema ser modelado como um sistema baseado em agentes ou não. Ainda, agentes de um subsistema podem se comunicar diretamente com outros subsistemas ou agentes.

Outra aplicação de Sistemas Multiagentes na indústria é a RETSINA (*Reusable Task Structure Based Intelligent Network Agents*) [Sycara et al., 1996], uma infraestrutura para Sistemas Multiagentes abertos desenvolvida pelo *Intelligent Agents Group* da *Carnegie Mellon University*, nos Estados Unidos, com base no valor agregado que um Sistema Multiagentes poderá fornecer no futuro. O princípio do sistema é que os agentes devem formar uma comunidade de nós que operam em relações ponto a ponto. Nessa, a coordenação deve emergir das relações entre os próprios agentes, e não deve ser imposta pela infraestrutura. Para isso, RETSINA não adota nenhum controle centralizado, mas implementa uma infraestrutura de serviços distribuídos que facilita as relações entre os agentes, ao invés de gerenciá-los.

A infraestrutura RETSINA tem sido utilizada para várias aplicações, incluindo um sistema de gerência de carteiras de investimento (WARREN) [Decker et al., 1996], um

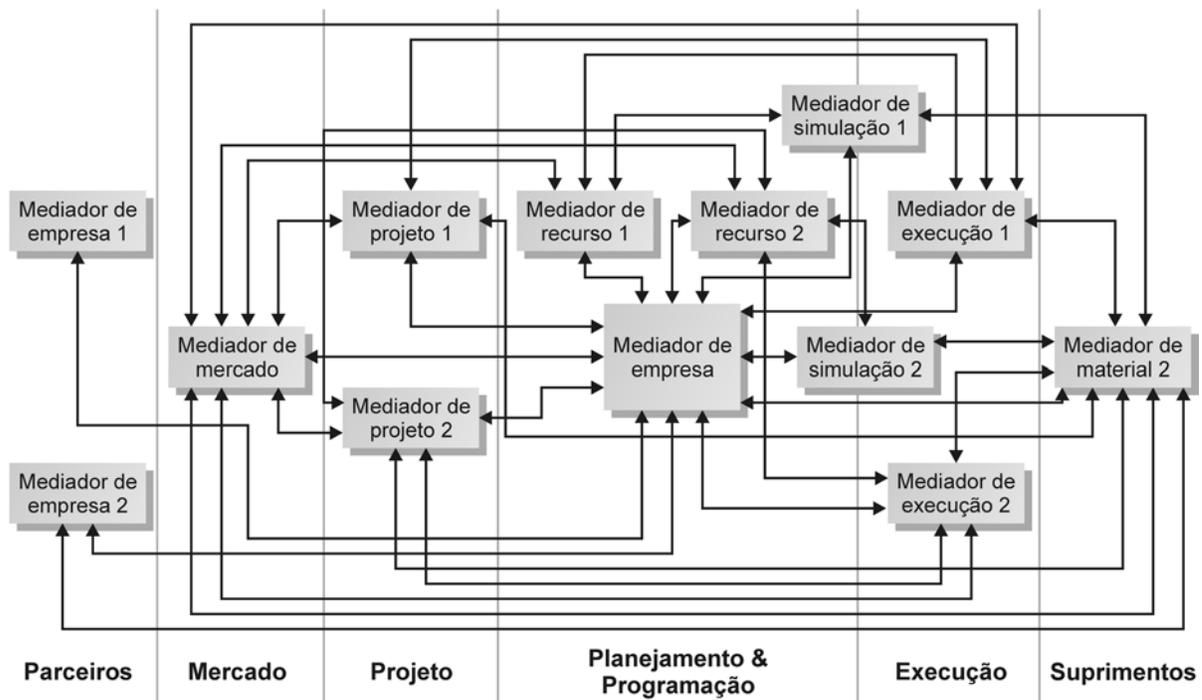


Figura 4.4: A arquitetura MetaMorph II [Shen et al., 1998]

sistema de leilão para comércio eletrônico (COALA) [Tsvetovat & Sycara, 2000] e um agente agenda para a administração de tarefas via internet (RCal) [Payne et al., 2002].

Existem, ainda, outras tecnologias baseadas em Sistemas Multiagentes cujas aplicações podem ser encontradas em ambientes industriais. Embora Parunak (1998) confesse que agentes não sejam a panacéia em aplicativos industriais, esse mostra várias iniciativas na direção de novos Sistemas Multiagentes, conforme mostrado na tabela 4.2.

Uma tendência na busca de novas aplicações industriais é a associação dos conceitos de Sistema Multiagentes com o paradigma holônico. Enquanto foco desta tese, três dessas iniciativas serão mostradas nos itens a seguir.

## 4.2 Sistema Holônico de Informação para PME

Os conceitos dos sistemas holônicos podem ser utilizados no desenvolvimento de um sistema de informação na busca de vantagens competitiva para pequenas ou médias empresas (PME) [Toh et al., 1997]. Seguindo o argumento central deste trabalho, a

Tabela 4.2: Tecnologias industriais baseadas em Sistemas Multiagentes [adaptado de Parunak, 1998; Shen & Norrie, 1999]

<b>Projeto</b>	<b>Grupo</b>	<b>Domínio</b>
<i>ABMA</i>	<i>Architecture Tech Co.</i>	<i>Integração de empresa</i>
<i>ACDS</i>	<i>University of Michigan</i>	<i>Engenharia Simultânea</i>
<i>ADE</i>	<i>Gensym Co.</i>	<i>Gestão da Cadeia Logística</i>
<i>AIMS</i>	<i>Lockheed Martim</i>	<i>Manufatura Ágil</i>
<i>ATP</i>	<i>NIST</i>	<i>Manufatura Ágil</i>
<i>CIIMPLEX</i>	<i>UMBC</i>	<i>Integração de empresa</i>
<i>CLAIM</i>	<i>RMIT</i>	<i>Integração de empresa</i>
<i>IA Framework</i>	<i>EIT</i>	<i>Integração de empresa</i>
<i>IAO</i>	<i>University of Calgary</i>	<i>Manufatura inteligente</i>
<i>IDCSS</i>	<i>CSS - MIT</i>	<i>Engenharia Simultânea</i>
<i>ISCM</i>	<i>University of Toronto</i>	<i>Gestão da Cadeia Logística</i>
<i>KRAFT</i>	<i>KRAFT Consortium</i>	<i>Gestão do conhecimento</i>
<i>Madefast</i>	<i>Stanford</i>	<i>Engenharia Colaborativa</i>
<i>MADEsmart</i>	<i>Boeing</i>	<i>Engenharia Colaborativa</i>
<i>PACT</i>	<i>EIT, Inc.</i>	<i>Engenharia Simultânea</i>
<i>RAPPID</i>	<i>Altarum</i>	<i>Engenharia Simultânea</i>

performance de uma empresa pode ser melhorada através de um sistema de informação adequado. Reconhece-se, assim, a informação como uma chave para integrar a manufatura e tornar o negócio mais flexível, re-configurável e ágil.

Para traduzir esse conceito para as pequenas ou médias empresas, essas devem inicialmente ser vistas como um sistema casualmente holônico. Uma grande empresa é dividida em partições devido a sua estrutura hierárquica, mas pequenas e médias empresas podem não ser efetivamente modeladas nessa mesma base. Assim, o primeiro passo é de identificar zonas que pareçam mais apropriadas.

A estrutura por zonas para uma empresa em particular é determinada através da identificação de áreas de atividade, concentração de processos de manufatura e arranjos físicos da empresa.

O estabelecimento de uma estrutura por zonas é o primeiro passo para a representação de uma empresa e parte da metodologia de desenvolvimento do projeto desse sistema de informação.

#### 4.2.1 *PMEs como sistemas casualmente holônicos*

Uma típica empresa pequena ou média pode ser descrita como uma estrutura casualmente holônica: a empresa, enquanto organização, segue os atributos inicialmente identificados por Koestler (1967) de colaboração e autonomia de trabalhadores individuais [Toh et al., 1997].

Essas empresas podem então ser representadas através de um modelo holônico, conforme visto na figura 4.5. Três zonas de atividades podem ser representadas como holons sociais: a área executiva, a área de negócios e a área de manufatura. Alternativamente, o holon de manufatura pode ser considerado uma holarquia de manufatura [Toh, 1997].

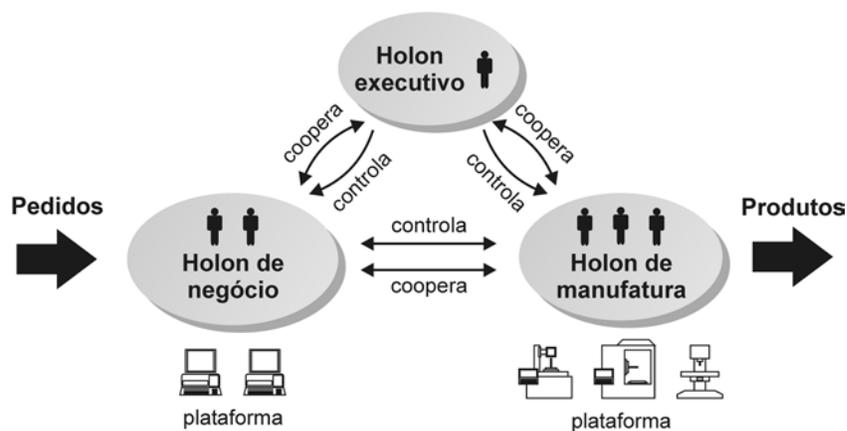


Figura 4.5: PME casualmente holônica [Toh, 1997]

A holarquia casual está construída com ligações entre os holons, as quais são, na verdade, as interações entre as pessoas. Os equipamentos de manufatura são suportados por sistemas computacionais externos ao holon. Essa representação é chamada de estrutura casualmente holônica, pois a holarquia social consiste inteiramente de grupos de holons humanos.

Pode ser notado que nenhum sistema de informações formal está incluído e, como conseqüência, os equipamentos computacionais e de manufatura não possuem nenhum papel nessa holarquia. Dessa forma, a inclusão de um sistema convencional de informação pouco irá adicionar ao desempenho dessa holarquia.

#### 4.2.2 A PME desenvolvida holonicamente

Um grande passo é dado quando uma empresa casualmente holônica é transformada num sistema formado por holons que integram homem, equipamento e informação [Toh, 1997]. A holarquia passa a abranger todo o sistema, sendo essa então chamada de empresa desenvolvida holonicamente. Esse desenvolvimento da estrutura organizacional da empresa provê suporte para os empregados de tal modo a dar a capacidade de desenvolver melhorias próprias no sistema. Essa representação deduz que, em cada nó, tanto operadores como equipamentos estão integrados à rede via um sistema de informação especificado em função do sistema holônico.

Conforme pode ser visto na figura 4.6, a composição de holon humano, estação de trabalho, sistemas operacionais de suporte e uma interface com a rede é chamada de holon nodal. No caso da zona de manufatura, essa classe de holon é aquela que possui a funcionalidade adequada e a configuração de rede apropriada.

Toh (1997) propõe um modelo para uma pequena ou média empresa suportada por um sistema holônico de informação. Nesse, a rede de informação é descrita em

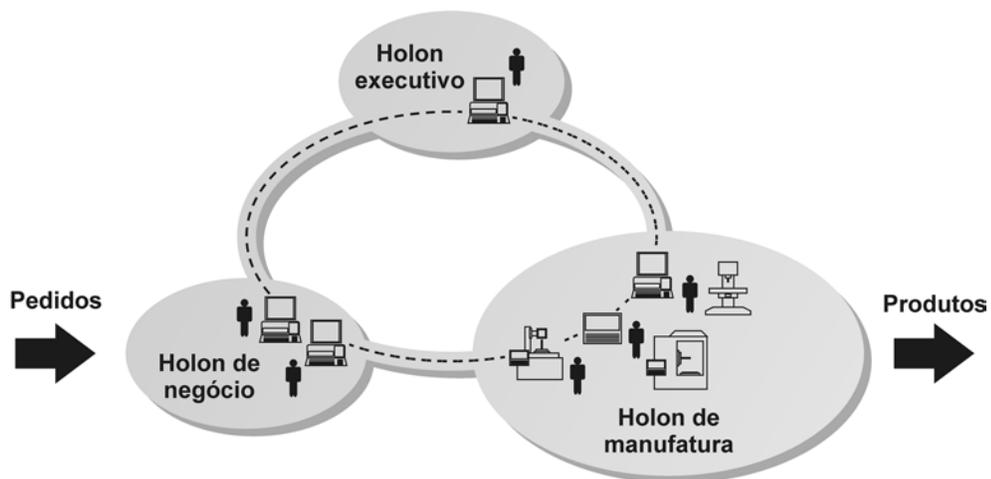


Figura 4.6: Representação holônica de uma PME [Toh, 1997]

termos convencionais: tanto o fluxo de colaboração do operador como o fluxo de informações entre as partes do sistema deve estar incluso. As estações de trabalho são descritas em holons nodais, mostrando como os conceitos apresentados podem ser concretizados. Existem, ainda, outros elementos importantes, os quais são os bancos de dados derivados do sistema holônico de manufatura.

A habilidade de se modelar a cooperação e a autonomia dos operadores suporta o levantamento das informações necessárias nos holons nodais e provê um fundamento para o desenvolvimento dos bancos de dados. Essa especificação é chamada Conjunto de Especificações de Informações Holônicas (HISS) e a implementação, Rede Holônica de Informação (HIN) [Toh, 1997].

Os holons nodais são claramente grupos de blocos construtivos desse sistema. Cada um desses blocos conectado a rede será definido como nó operacional, devendo ter um equilíbrio de funcionalidade adequado, suportando uma manufatura onde o papel principal é desempenhado pelo trabalhador.

O principal argumento no trabalho de Toh (1997) é que o conceito de empresa desenvolvida holonicamente leva a instalação de um sistema de informação apropriado. Ele se adapta ao *modus operandi* da empresa, sem a necessidade de se enrijecer o sistema como acontece com os sistemas tradicionais. No entanto, para isso se faz necessária uma metodologia de desenvolvimento desse sistema de informação.

### **4.3 Arquitetura de referência de controle PROSA**

Outra aplicação dos conceitos de sistema holônico [Koestler, 1967] é o desenvolvimento de novos sistemas de controle de manufatura. Para isso, Brussels (1994) sugere o desenvolvimento de uma nova arquitetura de referência: a PROSA (*Product-Resource-Order-Staff-Architecture*), resultado do Consórcio Internacional de IMS (este descrito no item 2.4.3 deste trabalho).

A formalização dessa arquitetura utiliza diagramas UML (*Unified Modeling Language*), um padrão de representação baseado na orientação a objetos [Rumbaugh et al., 1998], onde retângulos representam tipos de entidades (classes) existentes no sistema. Conforme pode ser visto na figura 4.7, a estrutura dessa arquitetura de

referência para Sistemas Holônicos de Manufatura (holarquias de manufatura) consiste, assim, de três tipos básicos de holons [Wyns, 1999]:

Holon de recurso: representa a parte física, chamada de recurso de produção do sistema de manufatura, e a parte de processamento de informação que controla o recurso. Oferece capacidade produtiva e funcionalidade aos demais holons. Esse tem habilidade para alocar os recursos de produção, além de conhecimento e procedimentos para organizar, usar e controlar os recursos de produção para gerar produção. Um holon de recurso é uma abstração de meios produtivos como fábricas, máquinas, fornos, veículos, matérias primas, espaço físico, mão de obra, etc.

Holon de produto: diz respeito ao conhecimento de produto e processo que assegura a correta produção do produto com a qualidade desejada. Contém informações consistentes e atualizadas do ciclo de vida do produto, requisitos do usuário, projeto, planos de processo, contas de materiais, procedimentos para a garantia da qualidade, etc. O holon de produto atua como servidor de informações para os demais holons, dando ao sistema a funcionalidade tradicionalmente atribuída ao projeto de produto, planejamento de processo e garantia da qualidade.

Holon de pedido: é o responsável por garantir que as tarefas do sistema sejam

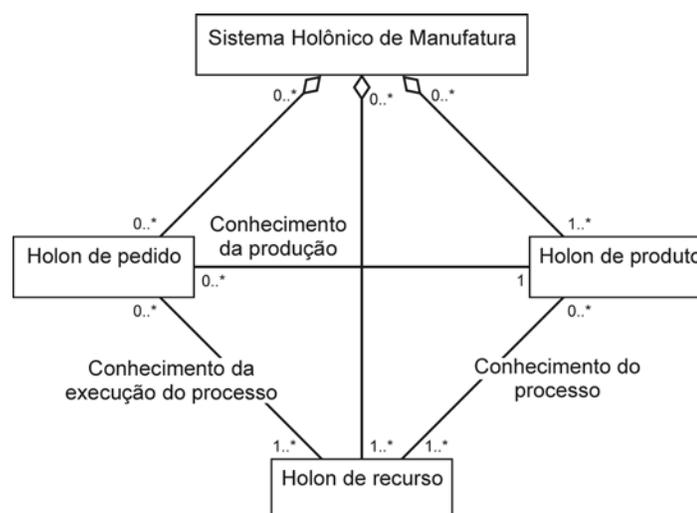


Figura 4.7: Holons básicos de um HMS e suas relações [Wyns, 1999]

cumpridas corretamente e no prazo. Representa os pedidos dos clientes, pedidos para o estoque, pedidos de protótipos, pedidos de manutenção e reparo dos equipamentos, etc. É a parte que deve gerenciar um pedido pela fábrica, negociando com outros pedidos e recursos em produção.

Ainda, esses três tipos de holons trocam informações sobre o sistema de manufatura, formando-se, assim, as seguintes linhas de troca de conhecimento [Wyns, 1999]:

Conhecimento de processo: são as informações relacionadas a como executar um certo processo num certo recurso. É o conhecimento sobre as capacidades do recurso, i.e, quais processos podem ser realizados, os parâmetros, a qualidade e as alternativas desses processos etc.

Conhecimento de produção: são as informações relacionadas a como produzir um certo produto utilizando-se certos recursos. É o conhecimento sobre os roteiros de fabricações possíveis de serem executados nos recursos, as estruturas de dados para representar o resultado dos processos, os métodos para acessar as informações desses processos, etc.

Conhecimento de execução: são as informações relacionadas ao progresso de execução de processos em certos recursos. É o conhecimento sobre como requerer o início de processos nos recursos, fazendo reservas de recursos, monitorando o progresso de execução, interrompendo processos, etc.

Nessa representação utilizando a UML, cada linha indica uma relação. Dependendo do símbolo utilizado em suas extremidades, um tipo de representação diferente é indicado. A seta indica uma relação do tipo “é um”, enquanto o losango indica um tipo “tem um”. Os números associados a cada extremidades indicam a quantidade de objetos a que esse tipo se refere.

Para a representação dos holons básicos da PROSA, pode-se interpretar que inúmeros Sistemas Holônicos de Manufatura possuem inúmeros holons de pedido. Por outro lado, inúmeros Sistemas Holônicos de Manufatura possuem pelo menos um holon de recurso.

### 4.3.1 Agregação

A agregação dos holons na PROSA indica justamente a hierarquia formada por seus elementos. Assim, holons agregados são definidos como um conjunto de holons relacionados, os quais são agrupados de modo a formar um holon maior com sua própria identidade. Dependendo do ponto de observação e da análise sendo realizada, um holon pode ser dividido em seus sub-holons ou pode ser tratado como um todo.

A figura 4.8 mostra a agregação de um holon de recurso. Os losangos indicam que uma fábrica pode ser dividida em holons de chão-de-fábrica, os quais, por sua vez, possuem estações de trabalho e equipamentos. Os números associados às relações mostram que, por exemplo, de zero a várias fábricas possuem de zero a vários equipamentos.

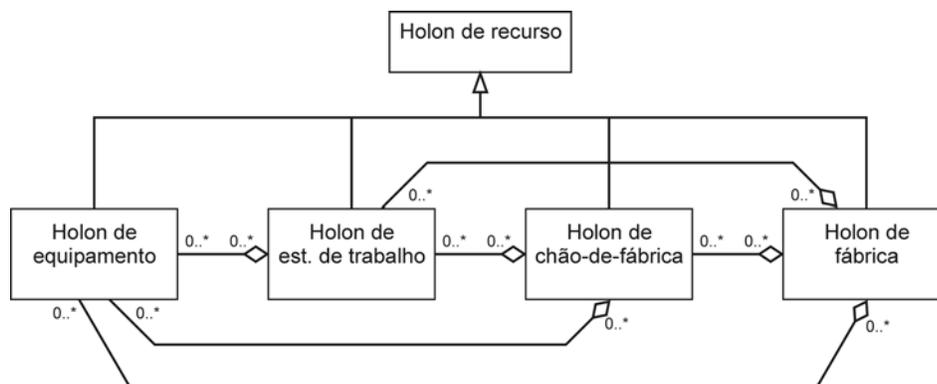


Figura 4.8: Agregação de holons de recurso [Wyns, 1999]

De maneira similar, pedidos e produtos também podem ser agregados. Pedidos de clientes podem ser divididos em ordens de produção, sendo ambas instâncias de um mesmo holon de pedido, e produtos podem ser quebrados em peças e componentes.

A hierarquia de agregação não assume, necessariamente, a forma de árvore, uma vez que um holon pode ser parte de múltiplas agregações. Ainda, essa estrutura não é estática, pois muda dinamicamente seu conteúdo de acordo com as necessidades do sistema. Novos holons podem emergir ou desaparecer de acordo com os processos de auto-organização a que o sistema está sujeito.

Uma particularidade de sistemas holônicos está relacionada com a recursividade de seus elementos [Wyns, 1999]. Segundo essa propriedade, um Sistema Holônico de Manufatura é um holon de recurso por si só. Enquanto parte integrante de um sistema maior (e.g. uma cadeia de suprimentos), esse sistema pode ser interpretado como um recurso dentro de um todo maior. Ainda, holons situados mais abaixo na hierarquia, podem ter também seu comportamento de todo. Assim, holons de recurso como máquinas e equipamentos possuem, além de outros holons de recurso, outros holons de pedido e produto. Isso os torna auto-assertivos diante das situações onde esse comportamento se faz necessário.

#### 4.3.2 Especialização

A especialização separa os holons de acordo com suas características [Wyns, 1999]. A figura 4.9 fornece uma representação para uma especialização de holons de recurso. As setas indicam que robô, máquina NC e esteira transportadora são tipos de holons de equipamento. Holons de chão-de-fábrica, holons de estação de trabalho e, inclusive, holons de equipamento são todos holons de recurso.

A mesma especialização pode ser utilizada para pedidos e produtos. Assim,

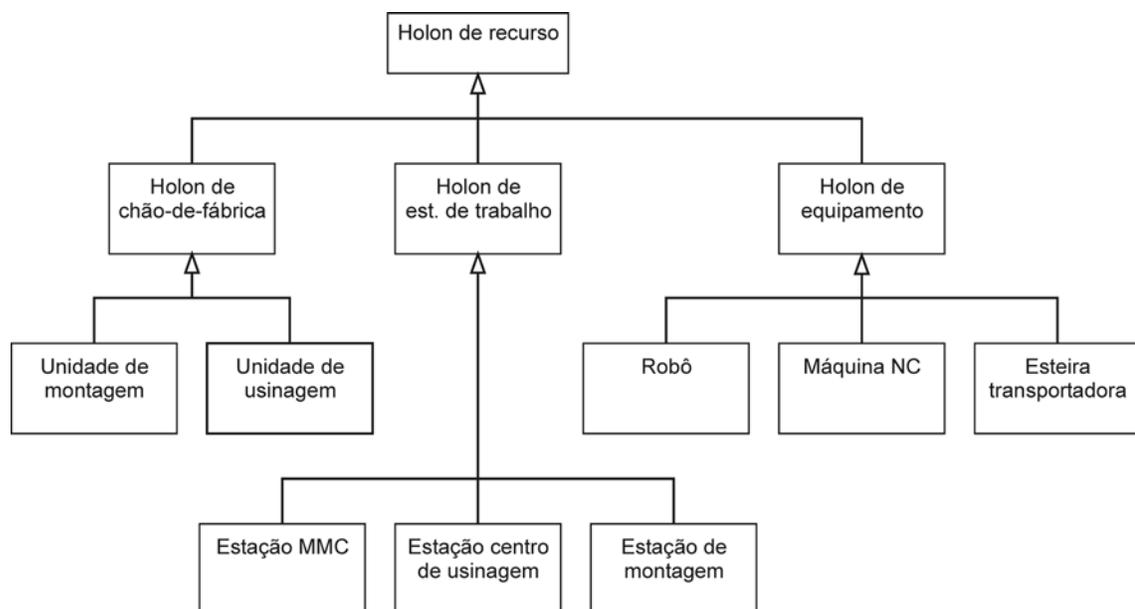


Figura 4.9: Especialização de holons de recurso [Wyns, 1999]

ordens de produção, pedidos de compra e requisições de manutenção são tipos de holons de pedido, enquanto peças e acessórios são holons de produto.

No entanto, cada um desses holons possui atributos próprios que os diferenciam entre si. À medida que os holons vão se tornando mais especializados, passa-se de um nível abstrato para outro mais prático e real (faz-se aqui uma analogia com o processo de consciência de ações descrito no item 3.5.1 deste trabalho).

### 4.3.3 Holons de suporte

A PROSA prevê a necessidade de holons que apoiem a operação dos holons básicos [Wyns, 1999]. Para isso, holons de apoio consideram casos específicos dos problemas enfrentados pelos holons básicos, apoiando-os com uma *expertise* maior que pode ser utilizado em processos mais complexos. Os holons básicos mantêm a responsabilidade pelas decisões tomadas, mas as informações dos holons de suporte são consideradas como respostas a consultas externas.

Por exemplo, holons de programação podem apoiar os holons de recurso no seqüenciamento de suas tarefas (figura 4.10). Em situações normais, os holons de recurso podem utilizar programações mais simples, automatizadas, que agilizam o processo corrente de tomada de decisões. Havendo casos específicos mais complexos, como um eventual rearranjo de um plano que tenha que considerar aspectos não previstos pelo algoritmo interno de programação, um holon de apoio pode ser consultado.

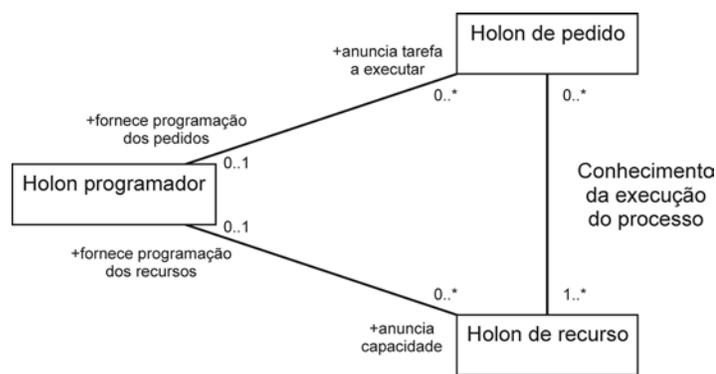


Figura 4.10: Um programador centralizado como holon de suporte [Wyns, 1999]

## 4.4 Arquitetura Holobloc

Outro resultado do *Test Case 5* do Consórcio Internacional de IMS é a arquitetura *HoloBloc* desenvolvida com o apoio da *Rockwell Automation*. Nesse projeto, Christensen (2003) propõe que sistemas holônicos consistam de um ou mais domínios de cooperação, i.e., espaços lógicos nos quais os holons podem se comunicar e interagir.

Na arquitetura *HoloBloc*, um holon de manufatura é um bloco autônomo e cooperativo de um sistema de manufatura, o qual transforma, transporta, estoca e valida informações e objetos físicos. Desse modo, esse holon contém conhecimento e componentes computacionais acompanhados de componentes físicos. Funcionalmente, um holon pode ser considerado como formado por um Sistema de Controle Inteligente (cabeça) e um Sistema de Processamento (base).

Os elementos do Sistema de Controle Inteligente podem ser vistos na figura 4.11. São esses [Fletcher et al., 2000]:

Controle de Processo/Máquina – PMC: é o responsável pela execução do plano de controle para o processo sendo controlado. O bloco de controle pode incluir algoritmos de controle tradicionais como lógica nebulosa [Pedrycz & Gomide, 1998] e redes neurais [Hagan et al., 1996].

Interface de Processo/Máquina – PMI: fornece a interface lógica e física para o sistema de processamento, através de uma rede de comunicação apropriada. Comunicações em tempo real são suportadas por uma cada de tempo real. O PMI pode conter elementos inteligentes como autodiagnóstico.

Interface humana – HI: compreende as interfaces com humanos como operadores, supervisores, pessoal de manutenção e engenheiros de processo.

Interface Inter-Holon – IHI: lida com a comunicação entre os holons. Essa também compreende os elementos que permitem que o holon negocie e coopere com outros holons. A IHI funciona como a instalação que suporta o domínio de cooperação através de um sistema de comunicação cooperativo.

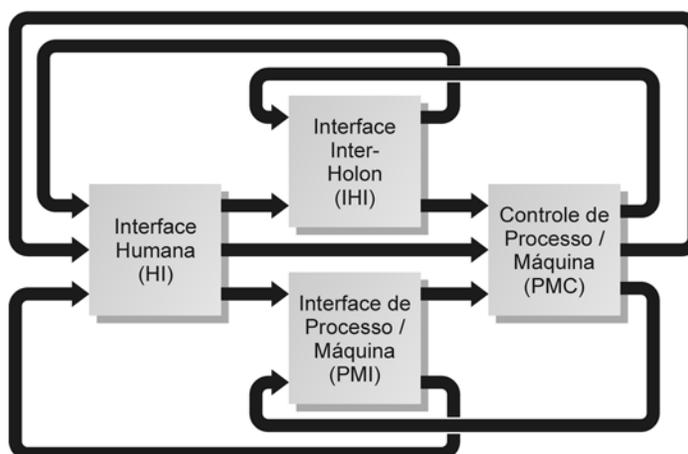


Figura 4.11: Estrutura do Sistema de Controle Inteligente [Fletcher et al., 2000]

O sistema de processamento consiste dos componentes necessários para realizar uma atividade de manufatura. É o responsável pela funcionalidade da manufatura, seguindo as regras e estratégias operacionais impostas pelo Sistema de Controle Inteligente.

Para prover a funcionalidade desse sistema, a norma IEC61499 [Lewis, 2001], da *International Electrotechnical Commission*, é utilizada na arquitetura *HoloBloc*. Nessa, o elemento construtivo fundamental é o bloco de função. O IEC 61499 fornece representações gráficas e textuais para especificar a seqüência de serviços e sua associação com eventos e dados quando o bloco de função representa uma interface de serviço como comunicação, por exemplo. É essa capacidade que permite que todos os elementos do Sistema de Controle Inteligente sejam implementados como instância interconectadas de blocos de função IEC61499.

Ainda, o IEC61499 possibilita representações gráficas e textuais para a construção de redes de blocos de funções para a configuração de equipamentos de controle holônico. Por fim, o padrão IEC61499 define as interfaces de serviços de manutenção de equipamentos, como a criação e interconexão de instâncias de blocos de funções, sendo essa característica que permite que controladores holônicos sejam dinamicamente re-configurados em resposta ao ambiente.

#### 4.4.1 Kernel Holônico

O Kernel Holônico (HK) é uma estrutura em camadas, formada por blocos de função IEC61499. Esse reside em cada recurso holônico e auxilia a gerência do holon através do fornecimento dos serviços necessários. O Kernel Holônico apóia o holon com os seguintes serviços [Fletcher et al., 2000]:

- Seleção dos blocos de função necessários para o fornecimento das habilidades necessárias para que o holon possa executar uma certa tarefa.
- Gestão do fluxo de dados e eventos entre blocos de função.
- Suporte a protocolos de interação e negociação com outros holons através do domínio de cooperação.
- Acesso às bases de dados e conhecimentos através das interfaces necessárias.
- Apoio à decomposição de tarefas, filtragem de informações, criação e validação de programações, etc.

A estrutura em camadas de um Kernel Holônico e as relações entre diferentes *kernels* pode ser vista na figura 4.12. Basicamente, cada um desses *kernels* é um grupo com quatro blocos de função exercendo os seguintes serviços de interface:

Gerenciamento de Blocos de Função (FBM): suporta a administração dos blocos de função de um recurso, criando, configurando e eliminando os blocos necessários.

Gerenciamento de Coordenação (CM): auxilia o controle de interação, tanto dentro como entre holons.

Interface de Domínio de Cooperação (CDI): fornece interfaces de holons para um ou mais domínios de cooperação, transferindo o conhecimento relacionado a tarefas, ontologias, etc.

Interface de Bases de Dados/Conhecimento (DKBI): gerencia informações no repositório local de informações do holon.

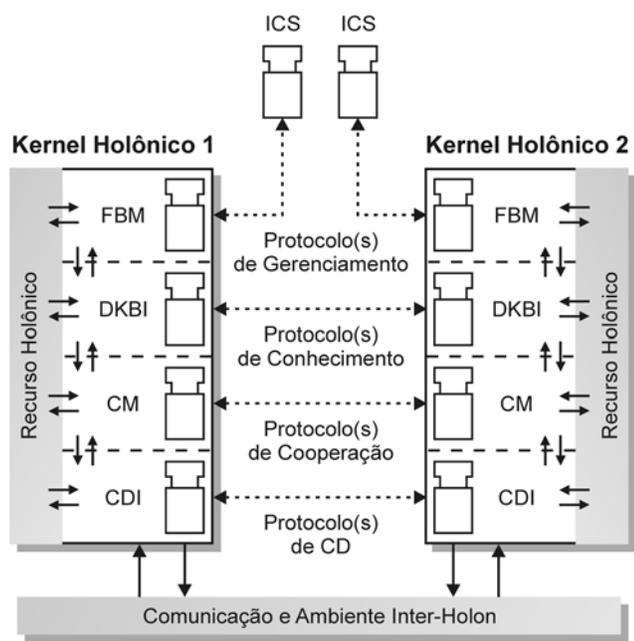


Figura 4.12: Estrutura do Kernel Holônico [Fletcher et al., 2000]

#### 4.4.2 Implementação da Arquitetura do HoloBloc

Para a implementação do *HoloBloc*, Christensen (2003) sugere a definição de dois domínios onde as tarefas de controle de manufatura ocorrem: o controle de baixo nível (LLC) e o controle de alto nível (HLC). O LLC se refere ao controle normal, não holônico, onde as funções de controle estão presentes. O HLC diz respeito à integração dessas funções em holons através de encapsulamentos em agentes. A tabela 4.3 resume as propriedades desses domínios, mostrando suas funções, entidades e ontologias, além de indicar sobre quais normas esses se fundamentam.

Tabela 4.3: Domínios LLC e HLC [Christensen, 2003]

Domínio	Funções principais	Normas	Entidades	Ontologia
LLC	Controle / Automação	IEC61499	Blocos de função	Operações físicas
HLC	Negociação / Coordenação	FIPA	Agentes	Tarefas de manufatura

A arquitetura LLC está focada nas funções associadas ao domínio de controle em tempo real, incluindo equipamentos físicos de controle e automação, comunicações em tempo real e entradas/saídas associadas aos processos industriais, máquinas, seus operadores, projetistas, instaladores e mantenedores.

Segundo essa arquitetura, o modelo de uma aplicação engloba uma rede de blocos funcionais interconectados pelo fluxo de eventos e dados. Os elementos dessa aplicação estão distribuídos em diversos equipamentos, sendo que seus blocos funcionais são instâncias de tipos cuja declaração formal é definida pela IEC61499.

Ainda, um equipamento pode ser formado por múltiplos recursos, os quais compartilham comunicação e interfaces de processos. Cada recurso pode conter aplicações locais, ou partes locais de aplicações distribuídas.

A arquitetura HLC está relacionada às funções associadas com o domínio de cooperação entre os holons, incluindo negociação e coordenação de tarefas. Estão também incluídos os aspectos de planejamento autônomo de tarefas que contribui para o alcance cooperativo de tarefas de manufatura através do escopo da funcionalidade do LLC.

O HLC é construído sobre um Serviço de Comunicação para Cooperação (CCS), sendo, assim, particionado em uma série de funções. Para isso, são seguidas normas da FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*), as quais abstraem agentes inteligentes e sistemas baseados em agentes heterogêneos [FIPA, 2002]. Suas funções, de acordo com a figura 4.13, são executadas em um ou mais domínios de cooperação, os quais coexistem e são interfaceados com as funções LLC no domínio de controle.

A arquitetura em camadas do HLC utiliza conjuntos de Kernels Holônicos para direcionar os serviços dentro de cada equipamento holônico. A tabela 4.4 mostra, para um domínio de cooperação qualquer, a partição das funções do HLC entre a Gerência de Blocos de Função (FBM), a Gerência de Coordenação (CM) e a Interface de Domínio de Cooperação (CDI).

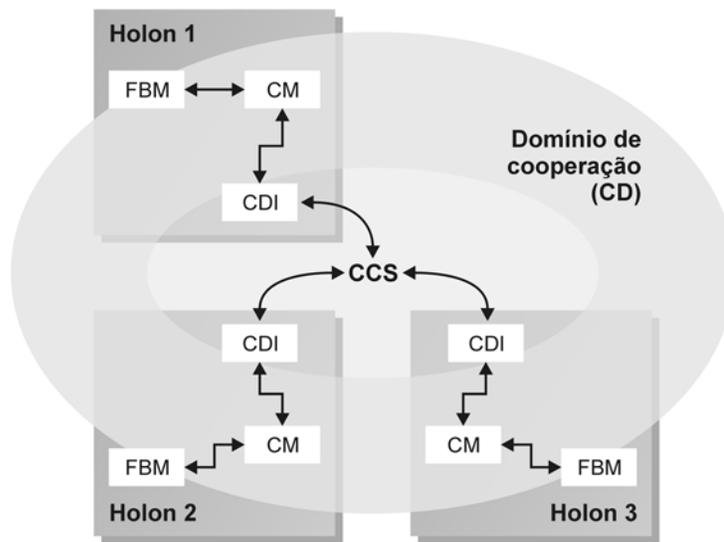


Figura 4.13: Arquitetura em camadas do Controle de Alto Nível (HLC) [Christensen, 2003]

Através da criação de funções de bloco específicas para interagir com o módulo CDI, cada holon se junta a um domínio de cooperação. O módulo CM pode, então, utilizar esse domínio de cooperação, e suas funções de bloco associadas, para trocar informações relevantes com outros holons. Concentrados no CDI, serviços apropriados são oferecidos tanto ao holon quanto a seu domínio de cooperação. Assim, é através da implementação do CDI que os usuários podem desenvolver suas interfaces.

Nesse sentido, desenvolve-se um sistema de controle holônico, baseado na arquitetura do *HoloBloc* e nos padrões ICE61499, o qual é capaz de atender de maneira ágil a mudanças econômicas e tecnológicas.

Tabela 4.4: Partição das funções HLC [Christensen, 2003]

Módulo	Função
<i>Interface de Domínio de Cooperação (CDI)</i>	<i>Localizar / juntar / liberar CD Oferecer / encontrar serviços Comunicar-se com outros agentes</i>
<i>Gerenciador de Cooperação (CM)</i>	<i>Negociar ontologias Manter bases de conhecimento Negociar tarefas e schedules Gerar / atualizar configurações LLC Coordenar execução de tarefas</i>
<i>Gerenciador de Blocos de Função (FBM)</i>	<i>Gerenciar configurações de LLC</i>



## Capítulo 5

# HSDD: a Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos

*Enquanto importante contribuição desta tese, desenvolve-se aqui uma metodologia para apoiar o projeto de Sistemas Multiagentes baseados no paradigma holônico. Para isso, princípios do Projeto Axiomático serão utilizados, levando a uma estrutura que facilite o melhor discernimento sobre suas necessidades e a identificação dos parâmetros que contribuam com sua satisfação.*

*O objetivo é o projeto de um sistema condizente com as hipóteses adotadas nesta tese, seguindo o paradigma holônico no processo de projeto, mesmo que essa seja uma tarefa difícil em sistemas distribuídos, e fornecendo o foco necessário para que seus conceitos possam ser mantidos quando um Sistema Multiagentes é projetado. O resultado é o desenvolvimento de uma estrutura batizada de Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD).*

*Assim, este capítulo começa com uma interpretação particular sobre o projeto de Sistemas Multiagentes, a qual é baseada nos níveis de interação de seus diversos elementos. Em seguida, a estrutura HSDD, com seu ambiente de projeto e seus meios de avaliação, é desenvolvida e seus princípios e conceitos são explicados. Por fim, conclusões fundamentais para o contexto deste trabalho, as quais buscam o melhor entendimento da metodologia proposta, são feitas.*

### **5.1 Projeto de Sistemas Multiagentes**

O processo de projeto é um conjunto de atividades com as quais projetistas selecionam e desenvolvem meios para que, estando sujeitos a condições de contorno que determinam os limites do problema, um conjunto de objetivos seja alcançado. Ao criar uma solução inovadora, selecionar uma já existente ou achar uma combinação entre as duas, esses projetistas chegam às respostas desejadas. Desse modo:

*“Projeto pode ser definido como o desenvolvimento e a seleção de meios que satisfaçam a objetivos, sujeitando-se a determinadas restrições.” [Suh, 1990]*

Ao se projetar um Sistema Multiagente, a primeira idéia que surge é a do desenvolvimento de um sistema computacional. Embora essa afirmação seja correta, como já pôde ser visto neste trabalho, não se trata de um problema trivial de programação. Por exemplo, um Sistema Multiagentes é aberto, i.e., seus agentes não são projetados necessariamente para atingirem os mesmos objetivos. Além disso, trata-se de um sistema com flexibilidade suficiente para que agentes entrem e abandonem o sistema de acordo com as necessidades do ambiente. E o problema se torna ainda mais complexo se esses agentes migram através de plataformas heterogêneas.

Sem dúvida, a essência de um Sistema Multiagentes é sua distribuição e, dependendo de seu tamanho e de sua configuração física, seu projeto também pode ser distribuído. Assim, pode ocorrer que as necessidades de um sistema sejam definidas em um ponto, mas seus projetistas estejam espalhados em diferentes localidades, e talvez continentes, separados por quilômetros de distância.

Para lidar com essas particularidades, Werner (1991) descreve o projeto de Sistemas Multiagentes a partir da definição de suas interfaces nos diversos níveis de sua arquitetura, indo desde a elaboração do problema e a concepção do sistema até as necessidades do usuário final e suas ações operacionais.

Werner (1991) parte da definição de meta-perspectiva como sendo o espaço onde um determinado observador é encontrado, atuando a partir de uma perspectiva de ação externa a um dado sistema. Na meta-perspectiva de um Sistema Multiagentes, o projetista, enquanto meta-agente, observador neste caso, não faz parte desse sistema. Se a meta-perspectiva é a visão do projetista, esse é, então, o meta-observador, e o sistema sendo observado é chamado de sistema objeto. Para fins de projeto, é fundamental que se faça a precisa distinção entre o sistema objeto e o sistema total, sendo este último formado também por seus meta-agentes.

Dado um sistema objeto e um meta-agente, as interações possíveis entre esses precisam ser definidas e especificadas de maneira clara e concisa. Quando uma possível interface é definida, sendo seus tipos de interações precisamente especificados, essa interface é um modo de interação.

No entanto, o processo de projeto inclui não apenas o sistema total (agentes, interfaces e sistema objeto), mas também a teoria e as linguagens utilizadas para se refletir e falar sobre o sistema e, com isso, projetá-lo e construí-lo. Em cada nível de interação, diferentes perspectivas podem ser encontradas, para cada qual há uma ontologia e linguagens próprias. Havendo uma linguagem particular associada a uma interface, essa deve incluir sintaxe, semântica e pragmática.

Existem, ainda, muitos níveis intermediários entre esses, mas, de acordo com a figura 5.1, a arquitetura, como um todo, pode ser dividida em [Werner, 1991]:

Meta-nível superior: delineado por uma linguagem meta-natural de interação (MNL), esse nível inclui, entre outros, um formalismo matemático para a definição de um meio de comunicação geral para o projeto do Sistema Multiagentes como um todo. É nesse nível que o sistema objeto é definido, bem como são levantados seus modos de interação (e.g. os requisitos de seu sistema operacional são identificados).

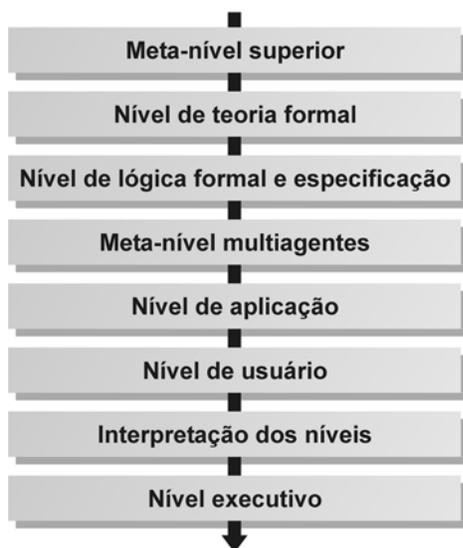


Figura 5.1: Níveis de interação no projeto de um Sistema Multiagentes

Nível de teoria formal: formado por uma linguagem meta-lógica de interação (MLL), o objetivo desse nível é o desenvolvimento de uma teoria para o sistema objeto. Esse nível inclui uma teoria para a arquitetura de agente, a cooperação, a comunicação e a organização. Esse pode, ainda, descrever as linguagens objeto de agentes (AOL), com as quais esses elementos se comunicam e interagem.

Nível de lógica formal e especificação: composto por uma linguagem de interação formada por lógica e semântica formais e por expressões matemáticas, seu objetivo é definir e especificar o sistema. Esse nível contém definições e especificações dos tipos de agentes, e como esses cooperam, comunicam-se e se organizam. Ainda nesse nível, as linguagens objeto de agentes (AOL) são precisamente especificadas através da descrição formal de sua sintaxe, semântica e pragmática e pela determinação de seus planos de execução.

Meta-nível multiagentes: descrito por uma meta-linguagem multiagentes (AML), cujo objetivo é programar o Sistema Multiagentes em alto nível, esse nível reflete as especificações feitas nos níveis anteriores. Trata-se da operacionalização de especificações da linguagem objeto de agentes, da interpretação pragmática e da organização de seus agentes. Esse nível deve decompor o sistema em agentes, grupos, organizações e sociedades distintas. Ainda, especifica-se e implementa-se nesse nível a semântica e a pragmática formais para a linguagem objeto de agentes (AOL).

Nível de aplicação: trata-se de uma aplicação particular para o sistema objeto. Esse nível utiliza a plataforma definida e especificada nos níveis anteriores para que um problema específico seja solucionado. É nesse nível que se encontra, por exemplo, o projeto de um Sistema Multiagentes que atenda às necessidades de um Sistema Holônico de Manufatura.

Nível de usuário: é o nível onde se encontra o usuário final do Sistema Multiagentes. Nesse nível, os tipos de acessos e permissões para esse usuário devem ser definidos de acordo com as necessidades do sistema em particular.

Interpretação dos níveis: refere-se à programação do sistema sendo projetado. A linguagem de interpretação, geralmente de alto nível, é uma linguagem de

programação que traduz a meta-linguagem multiagentes (AML), bem como os demais níveis e modos de interação. Há, assim, uma influência mútua entre esse nível e a meta-interface de projeto em si.

Nível executivo: é a interpretação do sistema, enquanto código a ser processado pelos níveis operacionais (e.g. interpretação da linguagem de operação de um robô). Nesse nível, processadores distribuídos não precisam, necessariamente, estar diretamente conectados, podendo a percepção e a comunicação através da linguagem objeto de agente (AOL) serem seu único meio de interação.

Através da noção desses níveis de modos de interação é possível entender mais claramente como meta-agentes se relacionam com o sistema objeto deste contexto: os Sistemas Multiagentes. Inclusive, essas relações entre meta-agentes e sistema objeto se aplicam às interações entre usuários e Sistema Multiagentes. De posse desse conceito, é possível levantar de maneira mais clara as necessidades do sistema, facilitando, assim, a seleção correta dos elementos que o compõe.

## **5.2 A estrutura HSDD**

O desenvolvimento de uma estrutura de projeto para Sistemas Inteligentes de Manufatura proposta nesta tese, é formalizado através da aplicação dos princípios do Projeto Axiomático, gerando um ambiente a ser chamado de Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD – *Holonic System Design Deployment*) [Franco & Batocchio, 2001]. O objetivo principal de tal formalismo é explorar as vantagens advindas da aplicação do paradigma holônico em sistemas distribuídos. Traduzindo isso para o domínio da Inteligência Artificial Distribuída (DAI), é possível se falar em agentes (holônicos) inteligentes, cooperação e comportamento social. Desse modo, o sistema holônico proposto pode ser tratado com um Sistema Multiagentes.

Partindo das particularidades existentes nos projetos desses sistemas, conforme tratado na seção anterior deste trabalho, essa abordagem está fundamentada pelos trabalhos de Projeto Axiomático desenvolvidos por Nam P. Suh, do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) [Suh, 2001]. O Projeto Axiomático cria um ambiente que descreve os diversos elementos que fazem parte de um projeto de uma maneira formal.

Com esse, o entendimento do sistema objeto fica mais fácil, principalmente quando seu projeto envolve a participação de vários projetistas. Sua motivação é a obtenção de um meio racional para qualificar um projeto; é uma forma de dizer o que é um bom projeto ou o que leva a um projeto insatisfatório.

Seguindo seus princípios, um projeto pode ser dividido em quatro domínios, independentemente do problema em questão [Suh, 1990]. De acordo com a figura 5.2, esses domínios podem ser generalizados em: domínio de consumidor, domínio funcional, domínio físico e domínio do processo. Associados a cada domínio, estão os elementos de projeto: necessidades de consumidor (CN), requisitos funcionais (FR), parâmetros de projeto (DP) e variáveis de processo (PV). Há, ainda, restrições (C), características que o sistema objeto deve ter para ser considerado aceitável, que limitam as soluções encontradas.

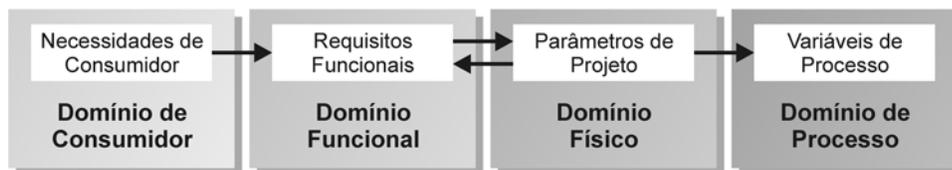


Figura 5.2: Domínios de projeto e seus elementos [Suh, 1990]

No processo de projeto, vários passos devem ser seguidos, passando de níveis mais genéricos para outros mais detalhados. Uma vez definidas as necessidades do consumidor, esse processo passa para a definição dos requisitos funcionais. Trata-se do conjunto mínimo de condições que caracterizam completamente os objetivos de projeto para uma necessidade específica em um determinado nível de abstração, satisfazendo, assim, os desejos de seus consumidores. Para cada requisito funcional, um parâmetro de projeto correspondente, elemento do sistema objeto que satisfaça um requisito funcional, deve ser encontrado. Uma vez que um requisito funcional pode ser satisfeito por um parâmetro de projeto, esse conjunto pode ser decomposto em novos sub-requisitos. Esse processo se repete, de forma iterativa, formando-se uma hierarquia de projeto.

### *5.2.1 Do domínio de consumidor para o domínio funcional*

O primeiro passo na abordagem do Projeto Axiomático é determinar as necessidades de consumidor. Para isso, uma série de atividades, as quais precedem a fase de projeto propriamente dita, devem ser realizadas para que a percepção das necessidades do sistema seja correta. Para o sistema objeto, o resultado dessa etapa forma o contexto de competitividade já explanado, o qual pode ser encontrado desde o primeiro capítulo deste trabalho.

A partir da definição do domínio de consumidor, o requisito funcional no mais alto nível de necessidades do sistema deve ser definido e aplicado no domínio funcional. Para isso, o sistema objeto deve atender a condição de agilidade aplicada a seu ambiente. Portanto, o primeiro requisito funcional do sistema objeto é declarado como:

**FR1 = Projetar um sistema ágil** (5.1)

O passo seguinte é mapear essa necessidade do domínio funcional para o domínio físico, determinando o parâmetro de projeto que satisfaça esse requisito funcional. Como, para o sistema objeto, explora-se o paradigma holônico no desenvolvimento de um Sistema Multiagente, o primeiro parâmetro de projeto é declarado como:

**DP1 = Sistema holônico** (5.2)

Definidos o requisito funcional FR1 e o parâmetro de projeto DP1 no nível mais alto, o processo segue iterativamente, voltando para o domínio funcional a partir do domínio físico. Esse segue processo até que sejam definidos parâmetros de projetos que possam, em níveis mais detalhados, ser implementados.

O próximo nível na hierarquia de projeto deve ser determinado pela decomposição do requisito funcional, o que é equivalente a determinar os requisitos funcionais do parâmetro de projeto selecionado. Já foi definido que o sistema objeto será implementado através de um Sistema Multiagentes.

Esse é um sistema computacional e físico que, de acordo com o paradigma holônico, deve ser aberto e conter outros agentes. Cada agente deve ser um elemento autônomo com um comportamento auto-assertivo. Embora haja situações onde um agente possa operar de maneira totalmente independente, à medida que sua interação com outros agentes aumenta, essas situações se tornam mais raras. Assim, um espaço cooperativo deve ser construído para garantir que os agentes interajam na busca de soluções mais eficazes. Ainda, o número de agentes é tal que o sistema objeto deve ser tratado coletivamente, como uma sociedade.

Portanto, o requisito funcional FR1 pode ser decomposto em:

**FR11 = Conter elementos autônomos** (5.3)

**FR12 = Agregar elementos cooperativos** (5.4)

**FR13 = Possibilitar um comportamento social** (5.5)

Holons devem criar e controlar a execução de suas estratégias e, a partir dessas, traçar seus próprios planos. É a autonomia de cada holon em uma perspectiva de todo. Em um Sistema Multiagentes, holons são entidades autônomas que podem ser encontradas monitorando e atuando sobre seu próprio ambiente. Fornecer-lhes inteligência, indica que esses agentes se tornam capazes de perseguirem seus objetivos e executarem suas tarefas. Sua operação é flexível e racional diante de uma variedade de circunstâncias ambientais, dadas as informações que possuem e suas capacidades de percepção e ação [Georgeff et al., 1999].

Embora holons sejam autônomos, não é esperado que trabalhem em absoluta autonomia. Ao invés disso, esses são requisitados para trabalharem segundo restrições, estando sujeitos, enquanto partes, às direções de seu sistema. Coordenação é a propriedade de um sistema de agentes executar alguma atividade em um ambiente compartilhado. O grau de coordenação é a extensão na qual cada atividade é executada em conformidade com os objetivos desse sistema, dentro de um ambiente seguro e saudável.

Sistemas holônicos consistem de holons distribuídos em vários níveis. Para se tornarem implementáveis enquanto sistema, normas e regras devem ser aplicadas, especificando como um agente inserido numa sociedade deve se comportar e formar um todo parcial. Mais especificamente, o sistema deve ter conjuntos de restrições a serem aplicadas em contextos particulares, organizando o sistema de tal modo que os princípios que o fundamentam sejam seguidos. Assim, um Sistema Multiagentes não deve passar por estados indesejados, situações que possam prejudicar a harmonia do sistema.

Portanto, para o sistema objeto, os parâmetros de projeto que atendem aos requisitos funcionais do segundo nível são declarados como:

**DP11 = Agentes holônicos inteligentes** (5.6)

**DP12 = Coordenação de sistemas distribuídos** (5.7)

**DP13 = Parâmetros organizacionais** (5.8)

O resultado das decomposições parciais pode ser encontrado na figura 5.3. Mas, estabelecer apenas os dois primeiros níveis da Decomposição de Projeto para Sistema Holônico não é, ainda, suficiente para garantir o projeto e a implementação de um sistema holônico satisfatório. Assim, o processo de decomposição deve seguir através dos requisitos funcionais FR1, FR2 e FR3. Esse processo pode ser encontrado nas seções seguintes.

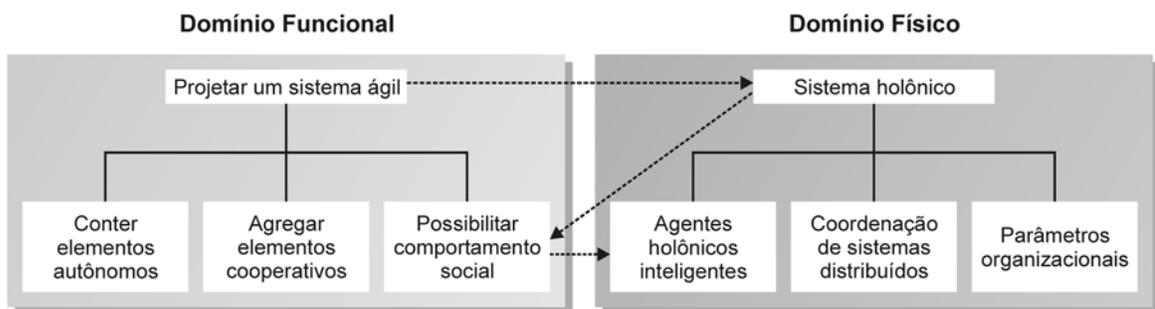


Figura 5.3: Processo de obtenção dos níveis mais elevados do HSDD

### 5.2.2 Agentes holônicos inteligentes

As tendências auto-assertivas provêm aos holons a estabilidade necessária para atuarem autonomamente nos casos em que circunstâncias imprevisíveis ocorrem. Isso habilita cada holon a lidar com determinados problemas sem que tenha que solicitar constantes assistências de outros holons, i.e., o holon deve ser uma entidade inteligente.

De acordo com Georgeff et al. (1999), enquanto uma entidade inteligente, um agente deve operar de maneira racional e flexível em diversas circunstâncias ambientais, o que é possível através de suas capacidades de percepção, deliberação e de atuação.

Para isso, um novo conjunto de requisitos funcionais é declarado como:

**FR111 = Ser sensível com seu ambiente** (5.9)

**FR112 = Tomar decisões adequadas** (5.10)

**FR113 = Atuar no sistema** (5.11)

Agentes inteligentes são capazes de perceber seu ambiente e responder a mudanças que ocorrer para satisfazerem seus objetivos. São indivíduos pró-ativos, por esses objetivos guiados, os quais não só encontram respostas como também sabem o porquê dessas no caminho que seguem.

Portanto, os parâmetros de projeto que satisfazem aos requisitos funcionais anteriores são declarados como:

**DP111 = Capacidade de percepção** (5.12)

**DP112 = Capacidade de raciocínio** (5.13)

**DP113 = Capacidade de atuação** (5.14)

Holarquias utilizam mecanismos de abstração hierárquicos para lidarem com grandes volumes de interações de entrada e saída existentes com seu ambiente. Para

isso, Koestler (1967) e Minsky (1985) adotam hierarquias de entrada e saída: hierarquias de entrada possuem mecanismos de filtros, enquanto hierarquias de saída operam segundo o princípio de gatilho.

Abordagem semelhante pode ser encontrada nas arquiteturas BDI (*Believe-Desire-Intention*), nas quais, baseadas no trabalho de Daniel C. Dennett [Dennett, 1987], processos de tomada de decisão são realizados sobre representações explícitas de crenças, desejos e intenções [Bratman, 1987; Georgeff et al., 1999].

O paradigma holônico define, ainda, cada holon como um cânone de regras fixas, mas com suas habilidades de gerar estratégias flexíveis. As regras prescrevem especificações sobre permissões que definem comportamentos que podem ocorrer, proibições que definem comportamentos que não podem ocorrer e obrigações que definem comportamentos que devem ocorrer. As regras são formadas por coerções impostas a cada atividade, a essas se somando máximas de conduta, imperativos morais e valores definidos pelo sistema [Koestler, 1967].

Já as estratégias flexíveis estão relacionadas ao processo de decidir a cada momento quais ações devem ser tomadas para o alcance dos objetivos, determinando as habilidades que devem lidar com determinadas situações.

O comportamento instintivo de animais explicado na seção 3.5.1 deste trabalho é um exemplo desses conceitos. Nesses, padrões repetitivos, caracterizados pelas ações mecanizadas, são colocados nos níveis baixos da hierarquia e as habilidades flexíveis (e mais complexas), utilizadas quando as situações normais se modificam, são associadas aos níveis mais elevados.

Esse mecanismo utilizado para gerar a hierarquia de níveis racionais de cada holon, é também adotado para prover a estrutura organizacional que garante o comportamento social de todo o sistema, como pode ser encontrado na seção 3.4.5 deste trabalho. Na verdade, tal qual fundamentado pelo paradigma holônico, esses conceitos se mesclam, uma vez que o comportamento social que garante que um sistema seja inteligente, pode, ainda, ser visto pela perspectiva de parte, gerando um agente inteligente.

### 5.2.3 Coordenação de sistemas distribuídos

Entidades cooperativas tentam alcançar como um time o que, como indivíduos isolados, não conseguem. Assim, cooperação é necessária quando nenhum indivíduo isolado tem expertise, recursos e informação suficientes para solucionar um problema, enquanto diferentes indivíduos podem ter habilidade para solucionar partes do problema, as quais, em seu conjunto, formam a solução completa.

Conforme foi visto na seção 3.3.1 deste trabalho, o propósito da coordenação é, nesse ambiente de interação entre diferentes indivíduos, alcançar ou evitar situações consideradas desejadas ou indesejadas por um ou vários sistemas. Nesse contexto, duas situações podem ocorrer quando os planos e intenções desses indivíduos devem ser combinados: os interesses desses indivíduos são antagônicos ou não.

Portanto, são declarados os seguintes requisitos funcionais:

**FR121 = Coordenar agentes não antagônicos** (5.15)

**FR122 = Coordenar agentes antagônicos** (5.16)

A cooperação, pré-requisito para o comportamento social, é obtida através do planejado, sendo este, por sua vez, o processo coordenação de indivíduos não antagônicos. Mas havendo divergências, ocorre a negociação, ou seja, a coordenação de indivíduos competitivos. Os parâmetros de projeto que atendem a esses requisitos funcionais são, então, declarados como:

**DP121 = Planejamento distribuído** (5.17)

**DP122 = Mecanismos de negociação** (5.18)

É justamente através de processos chaves como o planejamento e a negociação que um agente alcança um comportamento flexível e racional.

De acordo com o paradigma holônico, o planejamento pode ser obtido através de mecanismos similares aos algoritmos de busca [Yokoo & Ishida, 1999]. Fato

interessante é que, na mesma direção desses algoritmos, Koestler (1967) traça um paralelo entre tarefas de planejamento e a evolução da ciência:

*“Newton (...) adotou as leis de Galileu sobre a queda livre, mas rejeitou a Astronomia deste. Aceitou as leis planetárias de Kepler, mas demoliu o resto do edifício kepleriano. Não tomou como ponto de partida as teorias completas e ‘adultas’ deles, mas fez voltar seu desenvolvimento sobre os próprios passos até chegar ao ponto em que se desencaminhara. Tampouco foi o edifício kepleriano construído por sobre o edifício de Copérnico. A desengonçada estrutura dos epiciclos, ele destruiu, guardando apenas as suas fundações. Copérnico também não continuou a construir onde Ptolomeu havia parado, mas recuou dois mil anos, até Aristarco.” [Koestler, 1967]*

Essa passagem ilustra porque algumas vezes é necessário recuar para possibilitar um desenvolvimento significativo, como nos algoritmos de busca. É o *reculer pour mieux sauter* [Koestler, 1967].

Existem inúmeros algoritmos que podem ser utilizados no apoio a execução de planos e programações. Mas, independentemente da abordagem adotada, competência e coerência são fundamentais para a solução de problemas distribuídos.

Já os conflitos no processo de coordenação podem ser negociados através de mecanismos da mudança vertical de responsabilidades na hierarquia, fazendo com que holons em níveis superiores possam ser considerados mediadores das decisões que afetam os níveis inferiores.

#### 5.2.4 Parâmetros organizacionais

O agente social envolve abstrações da Sociologia e da Teoria Organizacional. De acordo com o paradigma holônico, qualquer organização social com um mínimo de coerência e estabilidade deve ser hierarquicamente arranjada [Simon, 1962]. Para isso, estruturas organizacionais adequadas, dinâmicas e flexíveis, devem ser adotadas. Ainda, devem ser criados meios para que os indivíduos interajam.

Ao recaírem sobre as necessidades de um sistema holônico, esses conceitos decompõem a estrutura de projeto nos seguintes requisitos funcionais:

**FR131 = Ser uma holarquia** (5.19)

**FR132 = Possibilitar a interação de agentes** (5.20)

Esses requisitos são importantes na definição de uma arquitetura para o sistema objeto. Essa arquitetura deve contemplar a estrutura organizacional do sistema e seus componentes, dependências, interfaces, dados, restrições, etc. Os parâmetros de comunicação, como protocolos, linguagens e níveis de interação, também devem ser definidos.

Portanto, os parâmetros de projeto que satisfazem esses requisitos funcionais são declarados como:

**DP131 = Estrutura organizacional** (5.21)

**DP132 = Modelo de comunicação** (5.22)

Um sistema holônico é uma estrutura aberta e re-configurável. Essa é uma estrutura formada por holons que possuem sua essência própria, o que garante sua individualidade dentro do sistema.

Como visto anteriormente, os papéis sociais que os holons desempenham em um sistema são definidos por suas funções. Trata-se de regras que incluem permissões e responsabilidades associadas a padrões comportamentais específicos.

Ações mecanizadas e estratégias flexíveis devem ser arranjadas em esqueletos de sistemas holônicos determinando sua individualidade. É a distribuição de agentes conforme sua característica puramente reativa ou sua habilidade racional prática. Basicamente, holons em níveis superiores são flexíveis, enquanto os níveis inferiores são rígidos, o que é coerente com a estrutura típica de organizações.

As tendências integrativas fazem com que os holons cooperem e transformem indivíduos em componentes de todos maiores. Retorna-se, neste ponto, a questão da

recursividade de um sistema holônico. Enquanto uma estrutura organizacional, uma holarquia precisa ser coerente com a perspectiva do todo, provendo o comportamento social, enquanto um agente se foca apenas em sua porção da estrutura. Sendo um agente parte de um todo superior, essa mesma holarquia deve saber o que precisa ser feito, como decidir o que fazer se houver escolhas, para quem enviar quais informações, quem aceita que tipos de informações, etc.

### **5.3 Medidas de desempenho de projeto**

A estrutura básica para a Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD) foi alcançada após as decomposições iniciais aplicadas sobre um sistema holônico e seu resultado pode ser visto na figura 5.4. Porém, esse processo iterativo de busca de requisitos funcionais e definição dos parâmetros de projeto equivalentes deve seguir até que parâmetros implementáveis do sistema objeto sejam alcançados.

Além disso, uma vez descrito o problema em termos de requisitos funcionais e parâmetros de projetos, deve-se analisar se esse é um “bom” projeto, o qual levará a um sistema bem sucedido. Para isso, o Projeto Axiomático [Suh, 1990] apresenta dois axiomas a serem utilizados sobretudo durante a fase de concepção de um projeto, os quais são declarados da seguinte forma:

*Axioma 1 - Axioma da independência: deve-se manter a independência dos requisitos funcionais.*

*Axioma 2 - Axioma da informação: deve-se minimizar as informações contidas em um projeto.*

Dependendo da aplicação específica para o sistema objeto, caminhos diferentes para a seleção de requisitos funcionais podem surgir e a eficiência do sistema objeto é dependente dessa escolha. Assim, após a formulação de um conjunto de requisitos funcionais e a síntese de um conjunto de possíveis parâmetros de projeto, os dois axiomas devem ser aplicados para se avaliar cada sistema proposto.

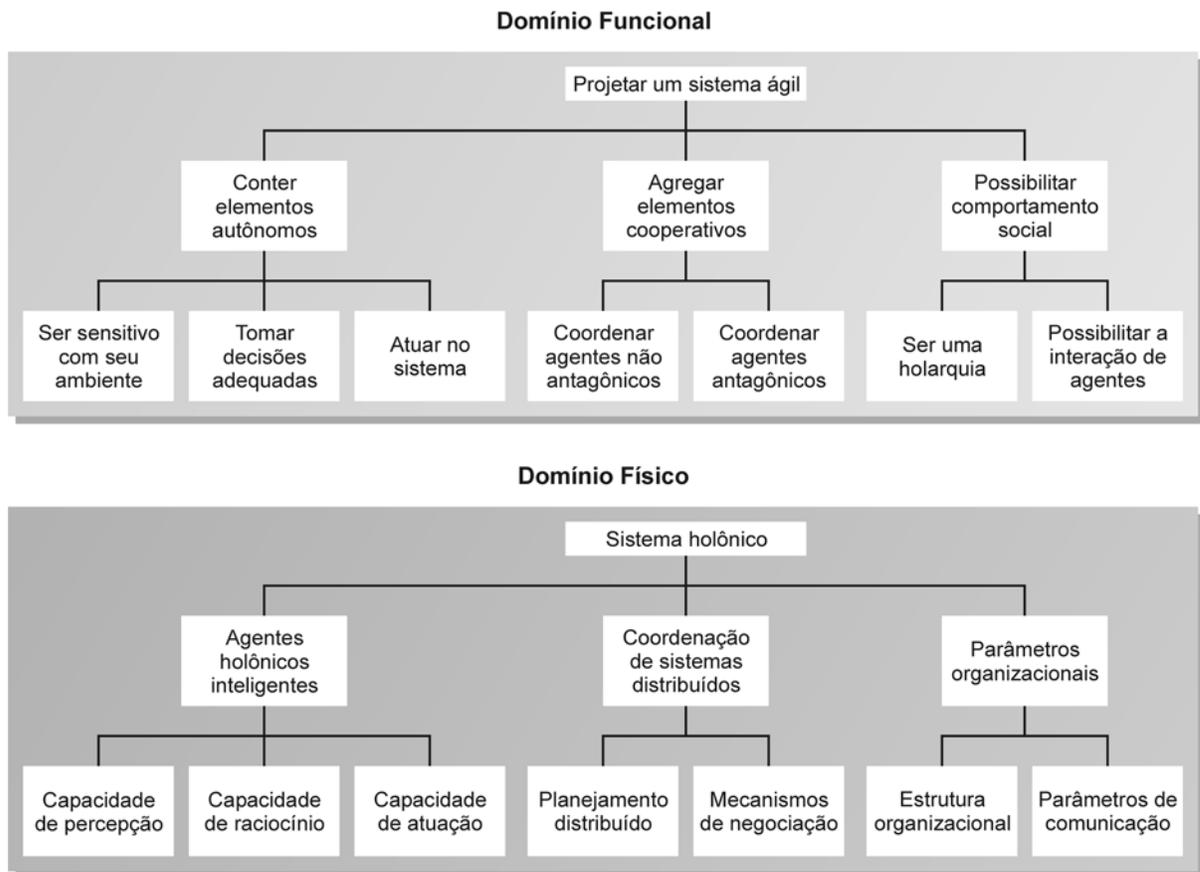


Figura 5.4: Estrutura básica do HSDD

Primeiramente, isso implica em saber como cada parâmetro de projeto influencia em cada requisito funcional. Um parâmetro de projeto é uma representação física de como se pretende alcançar uma determinada necessidade. Mas, muitas vezes, esse parâmetro pode não ter sido projetado de forma independente em relação aos demais requisitos funcionais. Assim, medidas sobre a influência dos parâmetros de projeto nos requisitos funcionais devem ser determinadas e apresentadas. Essa análise é feita através da matriz de projeto (DM).

Uma vez levantada e analisada a matriz de projeto, o projetista deve, ainda, se focar na quantidade de informações contidas no projeto do sistema objeto. De acordo com o segundo axioma, entre diversas alternativas viáveis, o melhor projeto será o mais simples desses.

### 5.3.1 A matriz de projeto (DM)

A matriz de projeto (DM) mostra as relações entre requisitos funcionais e parâmetros de projeto em cada nível da hierarquia de projeto. Assim, a matriz [DM] é resultado da seguinte equação de projeto [Suh, 1990]:

$$\{FR\} = [DM] \{DP\}$$

Em uma análise qualitativa, um "X" na matriz de projeto representa que há um efeito forte de um DP sobre um FR, enquanto um "0" indica um efeito fraco, relativo à tolerância associada ao requisito funcional. Como resultado, há três possibilidades para a natureza da matriz de projeto [Suh, 1990]:

Projeto desacoplado: a matriz de projeto se apresenta como uma matriz diagonal, onde os elementos "X" aparecem apenas nas relações diretas entre cada FR e seu respectivo DP (para a matriz [DM], cada elemento  $dm_{ij} = 0$  para  $i \neq j$ ).

Projeto semi-acoplado: a matriz de projeto se apresenta como uma matriz triangular, na qual os elementos "X" aparecem na diagonal e abaixo (ou acima) dessa (se a matriz [DM] é triangular superior, cada elemento  $dm_{ij} = 0$  para  $i > j$ ; ou, se a matriz [DM] é triangular inferior, cada elemento  $dm_{ij} = 0$  para  $i < j$ ).

Projeto acoplado: a matriz de projeto aparece com elementos "X" na diagonal e espalhados em qualquer posição, acima e abaixo dessa.

Em um projeto desacoplado, os requisitos funcionais podem ser satisfeitos independentemente através de seu parâmetro de projeto correspondente. De acordo com o Axioma 1, essa é a situação em que se consegue um projeto ideal, mantendo a independência funcional. Um projeto que possui funções interdependentes é um projeto acoplado ou semi-acoplado e viola o axioma 1. Assim, um projeto acoplado deve ser desacoplado, sempre que possível, adicionando ou alterando os componentes necessários e, sobretudo, a maneira como esses se configuram.

### *5.3.2 Probabilidade de sucesso*

A quantidade de informação ( $I$ ) é definida por Suh (1990) como sendo inversamente proporcional à probabilidade de sucesso em se satisfazer um conjunto de requisitos funcionais.

Ao gerar um requisito funcional, o projetista cria uma expectativa a ser satisfeita, havendo para essa uma certa tolerância, a qual é chamada de tolerância de projeto. Assim, cada alternativa de projeto disponível deve ser capaz de fornecer o requisito funcional desejado dentro da tolerância de projeto.

Há, ainda, a tolerância do sistema, dentro da qual uma alternativa opera em relação à tolerância de projeto. À interseção da tolerância de projeto com a tolerância do sistema dá-se o nome de região comum.

A probabilidade de sucesso ( $p$ ) de uma alternativa pode ser, assim, encontrada como razão entre a região comum e a tolerância do sistema, sendo o melhor projeto aquele que resultar na maior probabilidade, i.e, aquele que tiver a maior chance de ser bem sucedido.

Tomando-se como base um projeto desacoplado, seus requisitos funcionais devem ser considerados independentemente. Para esse, a quantidade total de informação contida no projeto para um conjunto de  $n$  requisitos funcionais é igual à somatória da quantidade de informação de cada requisito funcional. Assim, à medida que esse sistema se torna mais complexo, com uma maior quantidade de informação em seus elementos, menor é a probabilidade de que esse atenda com sucesso às expectativas de seu projetista. Se projetos semi-acoplados ou acoplados forem analisados de forma análoga, esse princípio se torna ainda mais crítico.

### *5.3.3 Avaliação do sistema objeto*

Para a estrutura inicial do HSDD, a matriz ideal (desacoplada) é a contida na tabela 5.1. No entanto, nem sempre essa é uma situação possível. Por exemplo, não é fácil que o requisito funcional de coordenar agentes antagônicos possa ser obtido sem que haja influência dos parâmetros de comunicação.

Portanto, a situação apresentada é um objetivo a ser perseguido durante um projeto e, quanto mais a esse o sistema objeto se aproximar, melhor será o resultado obtido. Até mesmo para o exemplo dado, relacionando-se comunicação e coordenação, isso é possível. Existem casos em que agentes são coordenados sem que haja um sistema direto de comunicação, como no exemplo dos robôs de exploração lunar descrito por Steels (1990). Assim, embora mecanismos semelhantes não sejam facilmente desenvolvidos para ambientes de manufatura, quanto mais o desacoplamento entre esses fatores for possível, melhor será o projeto.

Tabela 5.1: Matriz de projeto para a estrutura básica do HSDD

	Capacidade de percepção	Capacidade de raciocínio	Capacidade de atuação	Planejamento distribuído	Mecanismos de negociação	Estrutura organizacional	Parâmetros de comunicação
Ser sensível com seu ambiente	<b>X</b>	0	0	0	0	0	0
Transformar informação em conhecimento	0	<b>X</b>	0	0	0	0	0
Atuar no sistema	0	0	<b>X</b>	0	0	0	0
Coordenar agentes não antagônicos	0	0	0	<b>X</b>	0	0	0
Coordenar agentes antagônicos	0	0	0	0	<b>X</b>	0	0
Ser uma holarquia	0	0	0	0	0	<b>X</b>	0
Possibilitar a interação de agentes	0	0	0	0	0	0	<b>X</b>

## 5.4 Decomposição do sistema objeto

A estrutura básica até aqui proposta não alcançou parâmetros de projeto implementáveis. Assim, novas decomposições devem ocorrer, sendo realizadas novas análises para cada ramo já identificado.

#### 5.4.1 Capacidade de percepção

De acordo com a estrutura de projeto, todo agente holônico deve ser uma entidade inteligente, capaz de lidar com situações imprevisíveis. Esse requisito funcional levou à identificação da capacidade de percepção (DP111) como parâmetro funcional que atende à necessidade do sistema de ser sensível com seu ambiente (FR111). A decomposição desse ramo leva a subestrutura mostrada na figura 5.5.

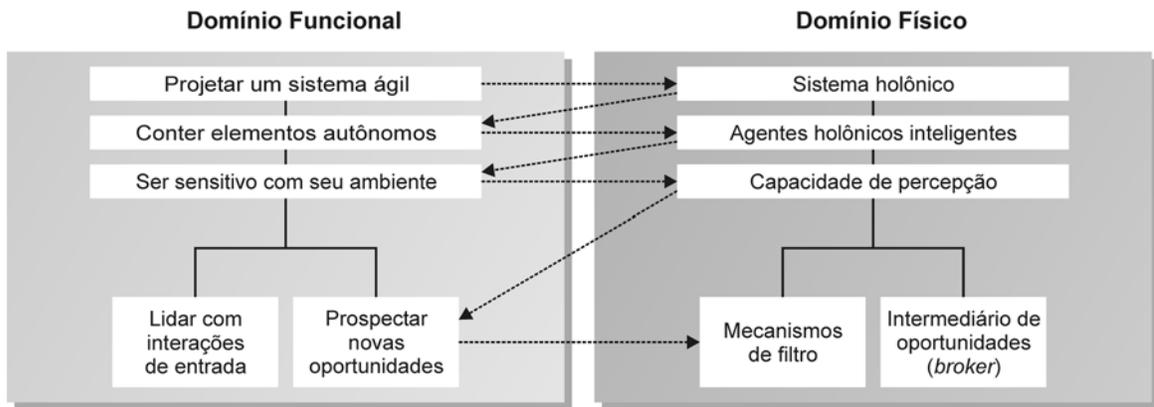


Figura 5.5: Decomposição da capacidade de percepção

O agente holônico a ser desenvolvido para o Sistema Inteligente de Manufatura proposto deve lidar com interações de entrada. Mas, muitas vezes, essas interações podem gerar uma grande quantidade de informações, levando a necessidade de um mecanismo que o auxilie para que respostas às mudanças em seu ambiente sejam obtidas em tempo hábil. Isso leva aos filtros propostos pelo paradigma holônico e também utilizados na arquitetura BDI para agentes inteligentes [Georgeff, 1999].

Ainda, o holon inteligente deve ser capaz de prospectar novas oportunidades em seu ambiente, o que pode ser obtido através de um tipo especial de agente com capacidades específicas para buscar novas oportunidades. Para isso, adota-se a figura de um intermediário (*broker*), o qual realiza exatamente esse papel.

#### 5.4.2 Capacidade de raciocínio

Outro requisito funcional de um agente holônico inteligente levantado na estrutura de projeto é tomar as decisões adequadas (FR112). A partir da definição do parâmetro de

projeto de capacidade de raciocínio (DP112), a decomposição mostrada na figura 5.6 é obtida.

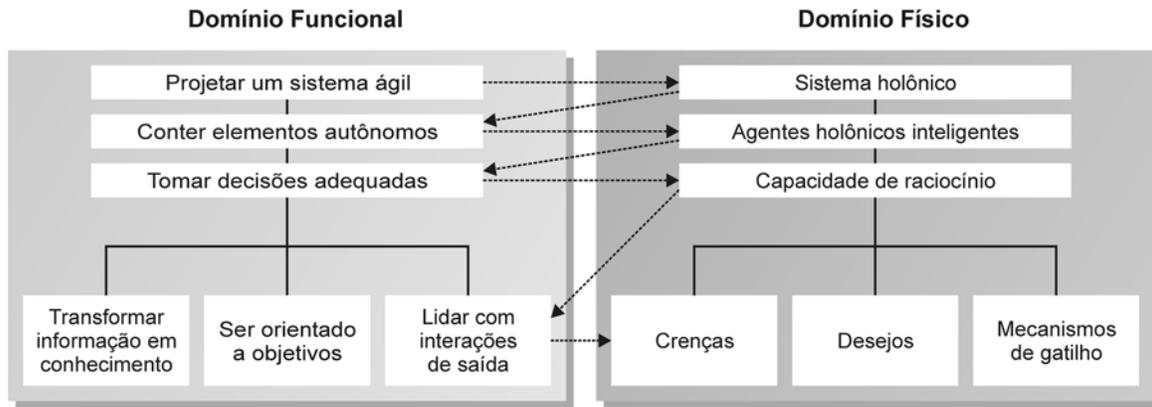


Figura 5.6: Decomposição da capacidade de raciocínio

O agente para o sistema objeto deve transformar informação em conhecimento. Modelos tradicionais, ou algorítmicos, geralmente trabalham com informações perfeitas. No entanto, o ambiente no qual o sistema objeto irá operar deverá gerar situações mais complexas, as quais não poderão ser tratadas de maneira determinística. Haverá informações parciais e muitas incertezas prevalecerão. Crenças, enquanto representações aproximadas do estado desse ambiente, são essenciais nesse contexto, uma vez que o sistema terá apenas uma visão parcial de seu mundo [Georgeff et al., 1999]. Assim, esse conceito, o qual é bastante aplicado pela Inteligência Artificial (AI), será adotado no Sistema Inteligente de Manufatura proposto.

De acordo com as Ciências Cognitivas, o raciocínio prático se dá a partir da definição de quais objetivos devem ser alcançados e como esses objetivos serão contemplados. Assim, a capacidade de raciocínio está diretamente associada ao processo deliberativo sob o qual o holon toma suas decisões [Bratman, 1987].

Nesse sentido, o agente holônico inteligente deve ser orientado a objetivos. Para responder a seu ambiente de maneira satisfatória, não basta a um agente ser reativo. Esse precisa ser, ainda, pró-ativo, i.e., deve agir de acordo com seus objetivos. Mas, assim como as informações de entrada, esses objetivos não podem ser representados por simples variáveis determinísticas. Em sua essência, um objetivo representa algum

estado final desejado, o que leva, pela própria característica de autonomia do agente holônico inteligente, a dependência de suas crenças e desejos nas deliberações que se processam.

Ainda, de acordo com as decisões deliberativas tomadas, o agente holônico inteligente deve lidar com interações de saída. Assim como em suas entradas, a quantidade de informações que o agente tem que lidar pode ser muito grande, fazendo com que os mecanismos de gatilho definidos pelo paradigma holônico se façam necessários.

### 5.4.3 Capacidade de atuação

Ainda de acordo com a estrutura de projeto, o agente holônico inteligente deve atuar no sistema (FR113), o que leva ao parâmetro de projeto de capacidade de atuação (DP113). Decompondo esse ramo, chega-se à subestrutura da figura 5.7.

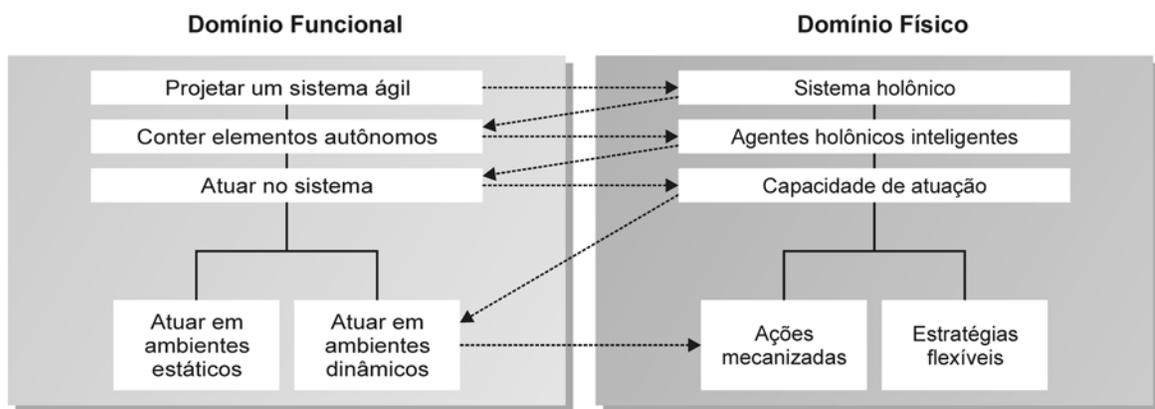


Figura 5.7: Decomposição da capacidade de atuação

Segundo o princípio de mecanização e liberdade, a ação a ser tomada depende da natureza da situação. Existem duas situações às quais um agente está sujeito: atuar em ambientes estáticos e atuar em ambientes dinâmicos. O agente holônico inteligente possui conjuntos de regras fixas e demonstra mais ou menos estratégias flexíveis. Como resultado, comportamentos definidos por ações mecanizadas e liberdade de ação formam um novo conjunto de parâmetros de projeto.

É importante voltar a destacar que o comportamento de um holon depende de sua posição na hierarquia. Agentes em níveis mais elevados mostram maior consciência em suas ações, enquanto aqueles em níveis mais baixos apresentam padrões de atividades mais previsíveis.

#### 5.4.4 Planejamento distribuído

A estrutura de projeto do Sistema Inteligente de Manufatura proposto define que o sistema deve coordenar agentes não antagônicos (FR121), o que leva ao problema de planejamento distribuído (DP121). A decomposição desse requisito funcional leva a subestrutura mostrada na figura 5.8.

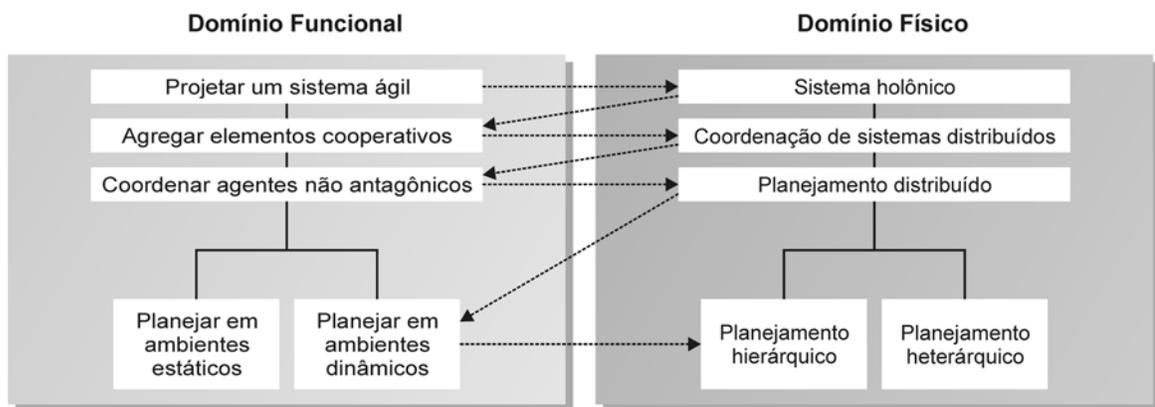


Figura 5.8: Decomposição do planejamento distribuído

O planejamento distribuído envolve a interpretação distribuída para determinar as ações apropriadas de cada agente. As informações necessárias podem estar também distribuídas, uma vez que cada agente deve possuir sua própria base de dados de planejamento local. Ainda, como já foi visto anteriormente, sua solução também é distribuída, o que complica ainda mais esse problema de planejamento.

A grande questão para se alcançar a agilidade necessária é a reformulação de planos. Havendo novas restrições para o problema, os planos já estabelecidos precisam ser refeitos e novas direções, adotadas. Assim como foi aplicado na programação de atividades de produção, na seção 3.5.2 deste trabalho, o paradigma holônico pode ser aqui utilizado para garantir a agilidade necessária.

Em situações normais, um planejamento hierárquico, o qual considera a otimização do sistema como um todo, pode ser seguido pelo agente. Esse é, então, assumido tal qual as ações mecanizadas, sem que deliberações mais conscientes devam ser realizadas sobre esse.

Mas, ocorrendo algum evento que demande um re-planejamento das programações já realizadas, modelos heterárquicos, independentes e auto-assertivos, o quais otimizam o desempenho do agente localmente, podem ser rapidamente definidos. A vantagem em relação a refazer os planos de forma global é a velocidade com a qual esse rearranjo pode ser feito.

Desse modo, em suas diversas perspectivas de todos e partes, o sistema objeto deve ser capaz de coordenar suas atividades de forma global e local, conforme as circunstâncias.

#### 5.4.5 Mecanismos de negociação

Além do problema de planejamento, o sistema objeto deve coordenar agentes antagônicos, aqueles que potencialmente poderão entrar em conflito (FR122), o que leva aos mecanismos de negociação como mais um parâmetro de projeto (DP122). A decomposição desse parâmetro leva a subestrutura indicada na figura 5.9.

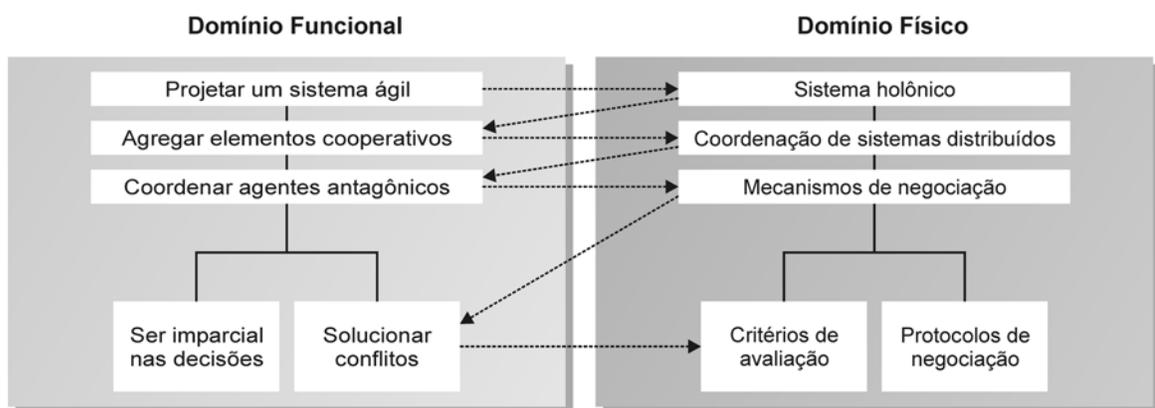


Figura 5.9: Decomposição dos mecanismos de negociação

A adoção de mecanismos de negociação deve considerar a agilidade na tomada de decisões. Automatizar esse processo significa a economia direta de tempo, mas, ainda, outras economias indiretas são passíveis porque agentes computacionais podem ser mais efetivos para encontrar comprometerimentos específicos com melhores benefícios em um curto prazo de tempo.

O ponto principal desse processo é a solução dos eventuais conflitos. De acordo com o paradigma holônico, isso é possível através de movimentações verticais na estrutura hierárquicas, levando a níveis mais competentes as decisões sobre conflitos de seus subordinados.

Para essas decisões, o holon decisor deve ser direcionado para um determinado fim e deve, através de critérios bem definidos, evitar que escolhas tendenciosas sejam realizadas. Assim, critérios de avaliação devem ser adotados, enquanto meio de criar um mecanismo justo e que leve a melhor decisão.

Uma vez selecionados os critérios, protocolos de negociação devem ser definidos, criando as regras a serem seguidas nas eventuais contentas. Esses protocolos devem ser desenvolvidos conforme as propriedades do sistema objeto e dos objetivos a serem alcançados.

Neste ramo da estrutura de projeto, o protocolo de negociação não se refere aos protocolos de comunicação de níveis mais baixos. Estes últimos fazem parte da infraestrutura de comunicação a ser especificada em níveis mais baixos do ramo de modelo de comunicação a serem abordados mais adiante.

#### *5.4.6 Estrutura organizacional*

A estrutura de projeto indica que o Sistema Inteligente de Manufatura proposto deve ser uma holarquia (FR131). Para isso, sua estrutura organizacional (DP131) deve atender aos requisitos funcionais indicados na figura 5.10.

Um requisito funcional do sistema objeto é possibilitar sua re-configuração, a qual deve ocorrer de maneira automática: é a capacidade de auto-organização desse sistema. Michel Debrum aponta para a auto-organização como um processo que se inicia a partir de elementos distintos ou entre partes semidistintas do sistema [Debrum,

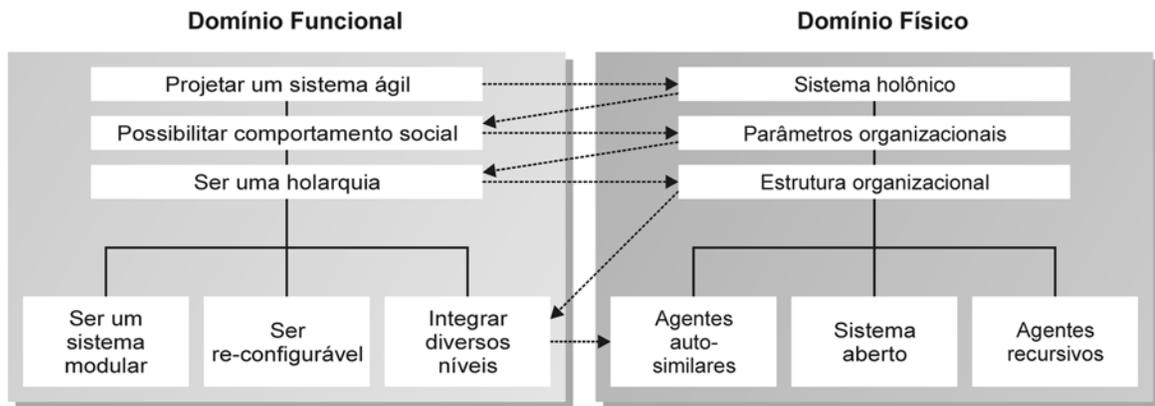


Figura 5.10: Decomposição da estrutura organizacional

1996]. Ao sofrer um processo de auto-organização, esse sistema pode apresentar alterações em intensidade de informação, ordem (e desordem), incertezas e ambigüidades. Isso significa que esse sistema, em uma primeira fase, evolui para uma nova disposição, caracterizando uma ruptura com suas formas e fronteiras anteriores. A seguir, em uma segunda fase, passa a sofrer fenômenos com os quais adquire, ao longo de sua evolução, um perfil global de comportamento mais estável.

Para o Sistema Inteligente de Manufatura proposto, isso significa a possibilidade de inclusão ou retirada de agentes (e.g. produtos, recursos e empresas) de acordo com as contingências necessárias e com o desempenho que se deseja alcançar. Significa, ainda, que esse deve ser um sistema aberto, com uma flexibilidade suficiente para que alterações ambientais possam conduzir a diferentes formas em sua organização.

Outro requisito de um sistema holônico, tal qual apontado em Simon (1963), é sua modularidade, a qual está diretamente relacionada à auto-similaridade dos indivíduos que formam o sistema objeto. Com isso, a reutilização de soluções se torna possível através de modelos mais uniformes e compatíveis. Na verdade, pode-se dizer que a auto-similaridade dos agentes holônicos é uma característica fundamental para o desenvolvimento de sistemas complexos. Nesses sistemas, a heterogeneidade desnecessária deve ser evitada e suprimida para reduzir o grau de complexidade do sistema [Warnecke, 1992; Minsky, 1985].

Já a recursividade diz respeito à integração do sistema em seus diversos níveis. Um sistema holônico consiste de holons dispostos em vários níveis, sendo que, conforme o requisito anterior, esses compartilham similaridades em suas estruturas. Embora fundamental, a auto-similaridade não garante a integração entre as estruturas (similares) distribuídas nos diversos níveis. Assim, surge um novo parâmetro de projeto que se foca na concatenação do sistema, possibilitando a interação (recursiva) entre partes e todos.

#### 5.4.7 Modelo de comunicação

Por fim, e ainda de acordo com a estrutura de projeto, o Sistema Inteligente de Manufatura proposto deve possibilitar a interação entre os agentes distribuídos em diferentes hierarquias (FR132). Para isso, o modelo de comunicação adequado devem ser definido e especificado (DP132). Decompondo esse ramo, chega-se a subestrutura apresentada na figura 5.11.

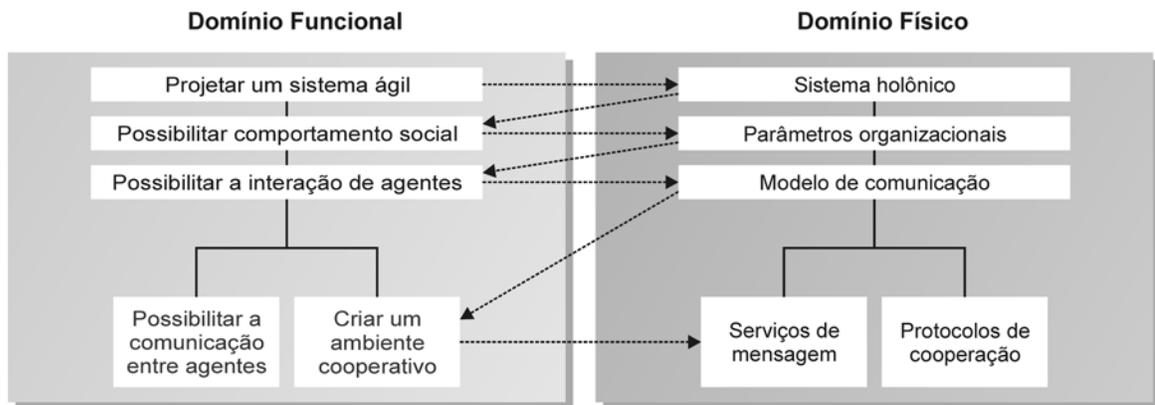


Figura 5.11: Decomposição do modelo de comunicação

Uma propriedade importante de um agente holônico é que esse possa se comunicar com outros elementos do sistema. A comunicação entre agentes deve ser suportada por uma estrutura na qual interações possam ocorrer mesmo que esses não se conheçam. Para isso, um serviço de mensagens eficaz deve ser implementado.

A troca estruturada de mensagens deve seguir regras de interação que descrevem as ações que cada agente pode tomar. Para isso, protocolos de

comunicação são definidos para descrever como a interação e a sincronização devem ocorrer entre agentes. Esses identificam e implementam as regras que devem ser seguidas para maximizar a coordenação e a coerência do sistema.

Já os protocolos de cooperação estabelecem uma estrutura de referência comum para que agentes possam cooperar. Assim como os protocolos de negociação, esses também estão em níveis mais altos que os protocolos de comunicação, sendo estes últimos implementados juntamente com a infra-estrutura de comunicação.

## **5.5 Os modos de interação e o HSDD**

Através da aplicação dos princípios do Projeto Axiomático é possível que uma estrutura de projeto para Sistemas Inteligentes de Manufatura seja desenvolvida. Os aspectos resultantes desse processo devem ser, então, contemplados na definição de uma arquitetura holônica para o sistema objeto. Assim, a decomposição do HSDD deve atender a cada uma das necessidades (requisitos funcionais e restrições) de modo a atingir uma tecnologia disponível.

Nota-se que cada nível da estrutura HSDD representa os níveis da hierarquia de projeto de uma arquitetura para um Sistema Multiagentes. Do meta-nível superior, a estrutura se decompõe em sub-estruturas mais operacionais até que o nível executivo é alcançado, tal qual no projeto axiomático.

A partir das definições do nível de teoria formal, pelo menos uma linguagem objeto de agentes (AOL), através da qual os agentes se comunicam e interagem, deve ser especificada.

O contexto no qual os Sistemas Inteligentes de Manufatura se inserem é a base formadora do meta-nível superior para o problema proposto neste trabalho. É a partir dos requisitos de um sistema inteligente, o qual une autonomia, cooperação e organização, que surgem as motivações para se projetar Sistemas Multiagentes específicos para essas necessidades.

A aplicação do paradigma holônico é a ponte entre o meta-nível superior e o nível de teoria formal. Nesse ponto, o sistema objeto é visto como uma série de

conjuntos de estruturas hierárquicas atadas por suas coesões sociais, as quais, de acordo com a maneira como se organizam, provêm um nível de inteligência bastante superior a de seus indivíduos isoladamente. A teoria de sistemas holônicos é, assim, o fundamento necessário para o sistema objeto.

À medida que novos níveis são alcançados, o sistema objeto vai se tornando mais visível. No nível de lógica formal e especificações, tornam-se claras as ferramentas a serem utilizadas na implementação dos agentes. É nesse ponto que surgem as necessidades de uma infraestrutura, a qual será propriamente definida e especificada no meta-nível multiagentes.

A partir desse ponto, surge uma aplicação específica. A arquitetura até aqui desenvolvida é submetida à prática, nível a nível, desde a formalização do problema específico até a implementação e operacionalização do sistema objeto. É o trabalho crucial, com a construção e programação do Sistema Multiagentes.



## Capítulo 6

# Infraestrutura Holônica para Sistemas Inteligentes de Manufatura

*Este trabalho apresentou em seu capítulo anterior a estrutura de projeto desenvolvida. A Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD) se mostrou um ambiente claro, que facilita a interpretação do paradigma holônico e a aplicação de seus conceitos. No entanto, isso não é suficiente para que a metodologia proposta possa ser validada.*

*Assim, este capítulo trata da aplicação dos conceitos desenvolvidos e apresentados neste trabalho. Para isso, define-se um Sistema Inteligente de Manufatura capaz de atender às pressões da economia digital como sistema objeto a ser projetado. A partir de seus requisitos, um ambiente para a aplicação, baseado em um Sistema Multiagentes, será selecionado, o qual servirá de base para a implementação de toda a infraestrutura necessária para o sistema objeto. Em seguida, a estrutura de projeto será aplicada, fazendo com que os parâmetros de projeto expostos no capítulo anterior sejam transportados para o domínio de processo, i.e., transformem-se nas definições e especificações que formam o Sistema Inteligente de Manufatura proposto. Por fim, o projeto resultante será avaliado segundo a matriz de projeto resultante.*

### **6.1 Ambiente para Sistema Multiagentes**

A estrutura de projeto desenvolvida no capítulo anterior pode ser aplicada para a seleção de um ambiente para Sistema Multiagentes, sobre o qual o sistema a ser projetado (sistema objeto) será implementado. Na verdade, dependendo das necessidades demandadas pelo sistema objeto, o projeto desse ambiente pode ser parte do processo de desenvolvimento de um Sistema Inteligente de Manufatura. No entanto, pelo escopo deste trabalho, a implementação proposta será realizada a partir da simples seleção desse ambiente.

O ambiente selecionado deverá suportar as definições e especificações levantadas na fase de projeto, seguindo, neste caso, as decisões tomadas com o apoio da Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD). Assim sendo, ao se projetar um sistema objeto que atenda às necessidades de um sistema real, os níveis superiores dessa hierarquia deverão suportar a seleção do ambiente.

Além das necessidades específicas do sistema objeto, um Sistema Multiagentes precisa de serviços essenciais de infraestrutura para que possa funcionar corretamente. Por isso, as seguintes características devem ser observadas durante a escolha ou projeto do Sistema Multiagentes [Shen, 1998]:

- Deve haver um serviço eficiente de nomes de agente, o qual evita que dois agentes possuam o mesmo nome, prevenindo, em consequência, eventuais confusões.
- Um serviço de localização de agente se faz necessário quando a existência e a disponibilidade dos agentes não são de conhecimento comum. Este tipo de serviço pode ser desenvolvido de forma centralizada, facilitando a implementação e a manutenção da base de localização. No entanto, essa abordagem faz com que o sistema se torne mais vulnerável por criar um único ponto de falha. Alternativamente, mecanismos de localização distribuídos, embora complicados de se projetar, implementar e manter, são mais robustos e confiáveis.
- O serviço de segurança, o qual se torna ainda mais crítico em sistemas abertos onde não se tem a certeza sobre a verdadeira identidade e a confiabilidade de outros agentes, é fundamental para monitorar e controlar eventuais pontos vulneráveis. Esses serviços podem se beneficiar de conceitos como assinaturas digitais [Syverson & Cervesato, 2001], mas o excesso de rigor gera, inevitavelmente, sobrecargas no processamento e nos meios de comunicação. Essa restrição leva a mais uma decisão a ser tomada: qual é o nível de segurança adequado para o sistema objeto?
- Os serviços de mobilidade podem viabilizar o funcionamento de agentes móveis [Kotz et al., 2002]. A maneira mais comum de prover este serviço é através de

servidores apropriados, que permanecem em execução nas máquinas onde é permitido o tráfego de agentes móveis.

Um aspecto importante a ser considerado é a robustez do sistema, onde a falha de um agente não deve implicar em uma falha de todo o Sistema Multiagentes. Ainda, dependendo das características específicas do sistema objeto e dos serviços essenciais necessários, diversos sistemas poderão ser exigidos. Dessa maneira, busca-se explorar as principais qualidades de cada ambiente, obtendo-se, com isso, melhores resultados.

Para fornecer a infraestrutura básica para a operação de agentes, será adotada a rede de agentes [Gudwin, 1996]. Ainda, como será visto mais adiante, o sistema objeto aqui desenvolvido irá prover um serviço de agentes móveis, o qual será desenvolvido a partir de um ambiente próprio.

Assim, este trabalho buscará na união da rede de agentes com um ambiente de agentes móveis a infraestrutura necessária para a implementação de seus desenvolvimentos.

### *6.1.1 Rede de agentes*

A rede de agentes surgiu com a necessidade de um ambiente capaz de implementar modelos baseados na Semiótica Computacional, seus signos com objetos e interpretantes. Para isso, o conceito de rede de agentes parte da definição formal de objetos, sistemas de objetos e, finalmente, redes de objetos [Gudwin, 1996].

Objetos, cuja definição, mesmo que matemática, está intimamente ligada a seu conceito físico, correspondem a uma entidade que existe e atua no mundo real, sendo caracterizada por suas propriedades (atributos). A definição de um sistema de objetos é uma especificação de conjunto de objetos, onde os valores das instâncias dos objetos (e mesmo sua existência em diferentes instantes) devem estar associados uns aos outros de acordo com as leis de disparo e regeneração de objetos.

Uma rede de objetos é um tipo especial de sistema de objetos, onde há restrições e condições complementares para que os objetos possam pertencer ao escopo habilitante de um objeto ativo [Gudwin, 1996]. A principal condição é que objetos estejam associados a lugares, fazendo com que cada objeto, em instantes

discretos no tempo, encontrem-se em um determinado lugar (figura 6.1). Ainda, cada lugar só pode ser ocupado por objetos do mesmo tipo.

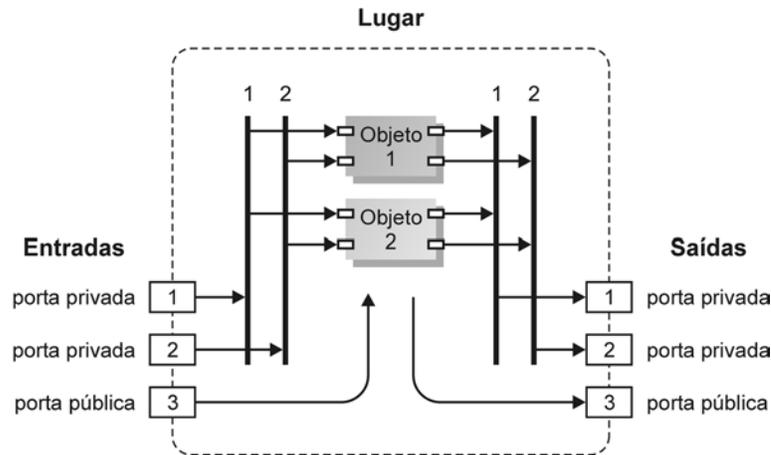


Figura 6.1: O conceito de lugar e a classificação de portas [Guerrero et al., 1999]

Objetos podem assumir comportamentos ativos ou passivos em uma rede de objetos. Enquanto objetos passivos são apenas repositórios de informações, os objetos ativos incluem também um conjunto de funções de transformação, as quais este utiliza para realizar operações de acordo com seu modelo interno.

Todos objetos possuem portas de entrada, as quais são representadas por uma lista de lugares que define os objetos que podem pertencer a seu escopo habilitante. Do mesmo modo, possuem portas de saída, sendo associadas a uma lista de lugares para onde os objetos pertencentes ao seu escopo gerativo deverão ser enviados. Ainda, para cada interface de entrada e saída do objeto, há um lugar específico associado.

Semanticamente, existem dois tipos de portas [Gudwin, 1996]: privadas e públicas. Uma porta privada de entrada é utilizada para alimentar objetos ativos que se encontram em um lugar ativo, de acordo com seu mecanismo de disparo. Uma porta privada de saída é utilizada para distribuir objetos gerados em um lugar ativo para outros locais. Já uma porta pública, seja essa de entrada ou de saída, é utilizada para colocar ou retirar objetos de um lugar.

Para cada lugar, está associada uma classe e dois conjuntos de arcos que conectam os diferentes lugares (arcos de entrada e arcos de saída). Objetos ativos poderão ter em seu escopo habilitante somente objetos que estejam em lugares conectados ao lugar onde se encontram por meio de arcos de entrada. Por sua vez, estes somente poderão enviar os objetos de seu escopo gerativo a lugares que estejam conectados ao lugar onde se encontram por meio de arcos de saída.

A rede de agentes é um caso específico de redes de objetos, especificação essa necessária para facilitar e, até este momento, tornar possível a operacionalização de sistemas baseados na Semiótica Computacional. Uma rede de agentes reflete o comportamento inteligente de um objeto ativo, já que, nesse caso, entende-se por agente um objeto com certo nível de autonomia ditado por seu interesse próprio [Guerrero et al., 1999]. É justamente dessa especificação que este trabalho se aproveita para implementar seus desenvolvimentos.

Como resultado do trabalho do *Computational Semiotics Group* da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (<http://www.dca.fee.unicamp.br/projects/semiotics/>), foi desenvolvido um ambiente computacional para a implementação de redes de agentes chamado de ONTOOL.

O ONTOOL é um ambiente que permite a criação e a simulação de modelos em rede de agentes, o qual é composto por três módulos principais [Guerrero et al., 1999]:

Ambiente de edição e controle: é uma interface gráfica através da qual modelos podem ser criados e analisados.

MTON (Multi-Threaded Object Network): é a biblioteca principal do programa, que, entre outras atividades, atribui diferentes linhas de execução para cada lugar da rede e dá suporte a classes externas.

Servidor de *plugins*: permite a conexão de objetos *Java* remotos via *Java RMI* (as versões mais novas do ONTOOL já utilizam *Corba* e *XML*).

Os recursos apresentados pelo ONTOOL compreendem uma forma modular de desenvolvimento de redes de agentes. A possibilidade de integrar classes externas aumenta em muito a flexibilidade em relação as aplicações possíveis. Ainda, a

compatibilidade com tecnologias de objetos distribuídos, como *Java RMI*, *Corba* e *XML*, faz com que esse ambiente forneça grande funcionalidade ao sistema objeto.

### 6.1.2 Agentes móveis

Um agente móvel é um tipo especial de agente capaz de se mover por pontos de uma rede de maneira assíncrona e autônoma. Trata-se de uma forma de código móvel que, assim como as aplicações de *applets (lightweight application)* e *servlets (lightweight server)* para internet, instala-se dinamicamente em computadores remotos.

A mobilidade permite que, ao invés de trocar grandes quantidades de informação com outros agentes, um agente se desloque para o mesmo espaço onde ocorre todo processo de colaboração ou negociação. Isso não só diminui o tráfego de informação em toda rede, como também reduz a latência do sistema através do encurtamento da distância entre os agentes.

Essa capacidade permite, ainda, que interações ocorram mesmo que algum processador dessa rede seja desligado, o que aumenta a robustez do sistema. Além disso, sendo o agente inteligente, esse pode interagir com diversos ambientes (heterogêneos), adaptando-se dinamicamente às circunstâncias locais.

Existem diversos ambientes para a implementação de agentes móveis, destacando-se: *Telescript* [White, 1994], *Concordia* [Wong et al., 1997] e *Aglets* [Lange & Oshima, 1998]. Para suportar a implementação do sistema objeto, foi adotado o *Aglets*, uma vez que se trata de um ambiente simples, robusto e cuja linguagem de desenvolvimento, a *Java*, é executada em sistemas heterogêneos e é compatível com o ambiente de rede de agentes. Além disso, seu código é aberto, propiciando que aplicações mais elaboradas possam ser desenvolvidas.

*Aglets*, cujo nome vem do inglês *lightweight agents*, são agentes móveis aplicados através do *Aglet API (Application Programming Interface)* [Lange & Oshima, 1998]. Um *aglet* é hospedado por um servidor de *aglets* que fornece o ambiente para esse agente executar suas tarefas. De acordo com a figura 6.2, esse servidor possui uma infraestrutura que lhe dá a confiabilidade necessária através de uma camada de segurança e da própria Máquina Virtual *Java* (JVM).

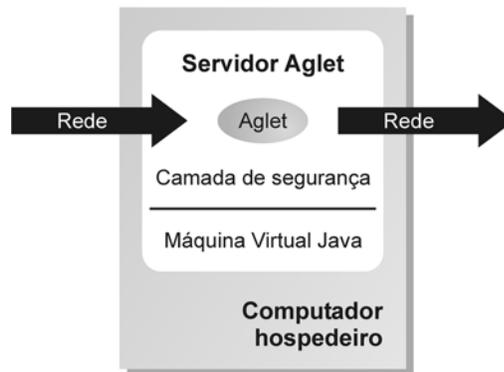


Figura 6.2: Servidor *Aglet* [Lange & Oshima, 1998]

O modelo por trás do *Aglet API* define um conjunto de abstrações e comportamentos necessários para alavancar a tecnologia de agentes móveis em redes TCP-IP. Suas principais abstrações são [Lange & Oshima, 1998]:

Aglet: é um objeto *Java* móvel que visita servidores de aglets em uma rede de computadores. Esse é autônomo, uma vez que ativa seu próprio processo (*thread*) ao chegar em um servidor, e reativo, por poder responder às mensagens recebidas.

Proxy: é uma espécie de representação para um aglet, a qual é utilizada como um escudo que o protege de um acesso direto a seus métodos públicos (figura 6.3). O *proxy* fornece, ainda, uma transparência de localização para o *aglet*, i.e., esse esconde sua verdadeira posição. Com isso, um *aglet* e seus *proxies* podem ser separados de modo que um *proxy* local encubra o *aglet* remoto.



Figura 6.3: Relação entre *aglet* e *proxy* [adaptado de Lange & Oshima, 1998]

Contexto: é o espaço de trabalho de um *aglet*, o qual é um objeto estacionário que provê meios para manter e gerenciar aglets executando em um ambiente de execução homogêneo (figura 6.4). Cada ponto em uma rede pode executar múltiplos processos de servidores e cada um desses pode ter diversos contextos.

Uma vez que um contexto possui um nome próprio, esse pode ser localizado através da combinação do endereço de seu servidor e seu nome.

Identificador: é a identidade de um *aglet*, sendo uma chave única, global e imutável por todo seu ciclo de vida.

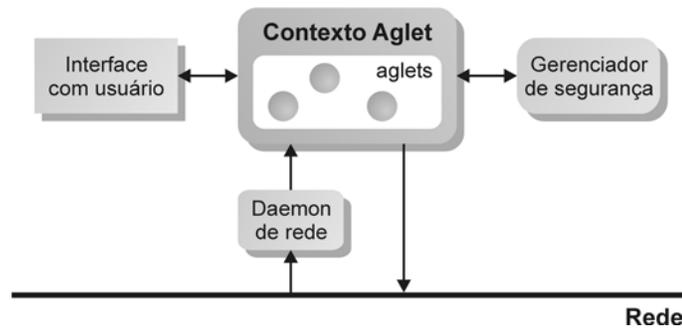


Figura 6.4: Contexto *Aglet* [Lange & Oshima, 1998]

O comportamento suportado pelo modelo do *Aglet API* é baseado no ciclo de vida de um *aglet*. Basicamente, existem duas maneiras de se trazer um *aglet* a vida: instanciando uma classe (criação) ou copiando um *aglet* já existente (clonagem). Pode-se, ainda, destruir um *aglet*, retirando-o do sistema para controlar sua população (eliminação).

Um *aglet* pode se movimentar de duas maneiras: ativamente ou passivamente. A forma ativa é caracterizada pelo controle da ação de movimento ser dado pelo próprio *aglet* (despache). Já, quando um hospedeiro remoto requer um *aglet*, trazendo-o para seu próprio endereço, caracteriza-se a forma passiva de movimentação (recuperação).

Quando *aglets* são executados, esses consomem recursos. Para reduzir esse consumo, um *aglet* pode ser colocado em estado de hibernação (desativação) para, quando novamente necessário, ser despertado (ativação).

Finalmente, múltiplos *aglets* podem trocar informações para executar uma determinada tarefa (serviço de mensagem).

Esse conjunto mínimo de operações que o *Aglet API* fornece já possibilita que um ambiente de agentes móveis seja colocado em prática. Apesar de simples, esse

ambiente básico, o qual será integrado à rede de agentes apresentada na seção anterior, mostra-se útil para a implementação do sistema objeto a ser desenvolvido. Ainda, operações adicionais podem ser facilmente acrescentadas através da programação de classes do tipo aglet mais sofisticadas.

### 6.1.3 Implementação do ambiente

O ambiente sobre o qual o sistema objeto será desenvolvido integra o *Aglet API* à rede de agentes (figura 6.5). Assim, aumenta-se as funcionalidades do ambiente, o que cria um grande potencial para o desenvolvimento de sistemas distribuídos.

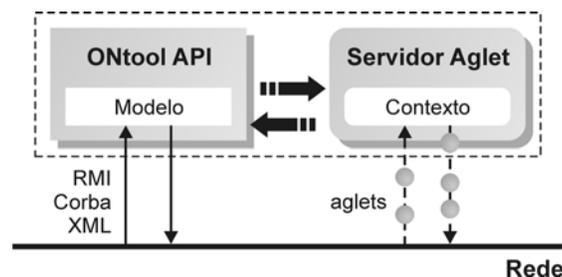


Figura 6.5: Modelo de aplicação do sistema objeto

Na implementação proposta para esse ambiente integrado, o *ONTOOL API* e o *Aglet API*, com um servidor de aglets associado a esse, são executados em paralelo. O objetivo principal é permitir que um modelo em rede de agentes possa criar um contexto de *aglets*, criar *aglets* e seus *proxies* e despachar/recuperar esses aglets em outros contextos. Dessa forma, todo modelo para o sistema inteligente de manufatura é implementado de maneira distribuídas em diversas redes de agentes. Ainda, esses modelos podem se comunicar em *Java RMI (Remote Method Invovation)*, *Corba (Common Object Request Broker)* ou *XML (Extend Markup Language)* e podem interagir através da troca de *aglets*.

Nesse intento, duas classes foram criadas:

*xAgletContext*: é uma classe externa da rede de agentes com a função de encapsular um contexto do *Aglet API*. Ao ser iniciado, o modelo de rede de agentes

deve criar um objeto do tipo *xAgletContext*, o que associará a esse modelo um contexto.

*xAgletProxy*: é uma classe externa da rede de agentes com a função de encapsular um *proxy* do *Aglet API*. A criação de cada objeto do tipo *xAgletProxy* faz com que um *proxy* e, como consequência, seu *aglet* sejam criados pelo contexto.

A figura 6.6 mostra a implementação dessas classes para um modelo simples de rede de agentes. Nessa representação adaptada da UML [Rumbaugh et al., 1998], foi acrescentado um novo conjunto de informações que indica a definição das portas de entrada e saída desse modelo. Assim, a classe *Resource*, por exemplo, possui as variáveis *inOrder* e *outOrder* do tipo *Order*, a função *process()* e as portas *i1*, de entrada, associada a um lugar representado pela variável *inOrder* e *o2*, de saída, associada a um lugar denotado pela variável *outOrder*.

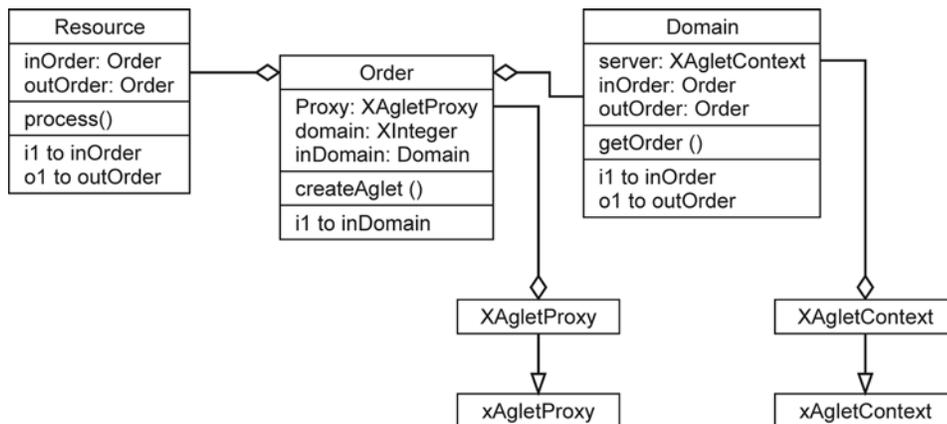


Figura 6.6: A integração da rede de agentes com o ambiente de agentes móveis

## 6.2 Aplicação da estrutura de projeto

Uma vez definido o ambiente onde os desenvolvimentos serão implementados, iniciou-se, neste trabalho, a aplicação da Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD). Na verdade, como já foi dito anteriormente, essa estrutura deveria ter sido utilizada para a seleção ou o desenvolvimento desse ambiente em si, mas, para fins de pesquisa, foi necessário que o ambiente estivesse implementado antecipadamente, para que diversos testes em sistemas protótipos pudessem ser realizados.

Como forma de testar a estrutura de projeto, o ambiente desenvolvido foi aplicado para o projeto de um Sistema Inteligente de Manufatura. Sua base está apoiada sobre os diversos sistemas já mencionados neste trabalho, destacando-se o Sistema Holônico de Manufatura (HMS) [Van Leeuwen & Norrie, 1997] e sua arquitetura de referência [Wyns, 1999]. Ao sistema resultante deu-se o nome de Infraestrutura de Aplicação para HMS (*HMS Application Framework*), e o objetivo principal foi a concepção de um ambiente para Sistema Inteligente de Manufatura que atendesse aos requisitos do Laboratório de Manufatura Assistida (LMA) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

### *6.2.1 Agente holônico inteligente*

O agente holônico inteligente é a personificação da visão da parte autônoma do sistema objeto. O Sistema Inteligente de Manufatura proposto por este trabalho é, assim, formado por unidades que, de acordo com seu estado de solicitações, podem atuar de forma independente.

Cada agente, aqui também chamado de holon, é capaz de lidar com as interações de entrada, dados, conhecimento e oportunidades, vindas de seu ambiente externo. Esse é um indivíduo reativo, o qual é capaz de gerar ações a partir dessas entradas. Ainda, esse é pró-ativo, sendo, com isso, capaz de tomar decisões sobre as ações a serem tomadas de acordo com seus objetivos.

#### *Modelo básico de agente*

Um agente holônico inteligente é, basicamente, um modelo em rede de agentes dotado de capacidades suficientes para torná-lo inteligente. A figura 6.7 apresenta esse modelo. Sua essência é, justamente, uma tendência auto-assertiva. Trata-se de um modelo autônomo, capaz de lidar de maneira eficaz com as demandas ao qual estará sujeito.

Basicamente, foram utilizadas quatro classes nesse modelo:

Recurso: é a representação dos holons de recurso, os quais encapsulam as partes físicas (recursos de produção) e o processamento de informação que as controla. Na rede de agentes, o recurso é um lugar onde os diversos holons de recursos

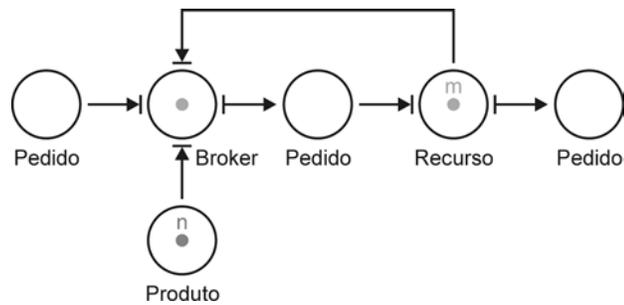


Figura 6.7: Modelo básico de agente

pertencentes a esse holon estão agrupados. Para processar os pedidos que chegam, esse lugar possui portas ativas de entrada e saída (representadas no modelo através dos traços perpendiculares na extremidade de cada arco). Ainda, para manter o agente *broker* atualizado, possui uma porta passiva de saída que atende constantemente a seus comandos.

Produto: é a representação dos holons de produto, os quais encapsulam o conhecimento de produto e processo que dá ao holon a capacidade de projeto de produto, planejamento de processo e garantia da qualidade. Seu lugar representa na rede de agentes o conjunto de produtos sobre os quais o holon exerce sua competência chave. Para alimentar o agente *broker* com as informações necessárias, esse lugar possui uma porta passiva de saída.

Pedido: é a representação dos holons de pedido, os quais encapsulam as demandas sob as quais o holon está sujeito. No modelo de rede de agentes, seus locais representam os estados pelos quais um pedido passa. Interagindo com os diversos tipos de holon, esse lugar possui portas passivas de entrada e de saída.

Broker: é o responsável pela prospecção de oportunidades externas ao holon, sejam essas vindas de outros holons ou do ambiente externo propriamente dito. Um objeto do tipo *broker* é um agente especializado, o qual faz o papel de comprador e vendedor. É uma espécie de corretor eletrônico que, ao mesmo tempo em que sonda novos negócios, faz a busca de potenciais parcerias para alavancar ainda mais a competência chave do holon. Ainda, é o *broker* que faz a integração entre recursos e produtos, selecionando a configuração mais adequada para atender a

cada pedido. Para isso, possui portas ativas de entrada e saída para esses três tipos de locais.

Uma rede de agentes, controlada por eventos discretos, processa passo a passo todas as atividades para as quais as classes foram programadas. Assim, para entender melhor o funcionamento desse modelo, e da própria rede de agentes em si, explana-se o processamento de holons de pedido na subseção seguinte.

### *Processando holons de pedido*

A principal tarefa de um agente holônico inteligente é processar pedidos. Para isso, o agente *broker* está constantemente monitorando o ambiente externo em busca de novos pedidos. Na rede de agentes, isso é representado pela transição de objetos de pedido entre os diversos lugares do modelo.

Um pedido chega ao agente *broker* através da porta de entrada associada ao primeiro lugar de pedido. O *broker* busca entre os holons de produto, quais são os requisitos básicos para o processamento desse produto. Os holons de produto podem cooperar entre si, juntando-se ou sugerindo modificação para formar novos produtos que satisfaçam a esse pedido. Essas informações são, então, colocadas no holon de pedido, sendo que essas seguirão com esse holon por todo seu ciclo de vida.

Uma vez definidos os requisitos do produto que satisfaz ao pedido, essas informações são passadas aos holons de recurso que fazem parte deste holon. O *broker* negocia com os recursos para definir quais desses são mais aptos para executarem as tarefas necessárias.

Terminado o processo de negociação e selecionado o recurso mais adequado, o agente *broker* libera o pedido. Entrando no próximo lugar, o pedido é capturado pelo recurso selecionado, o qual executa as tarefas necessárias e libera o pedido tão logo seus requisitos tenham sido cumpridos.

### *Deliberação em agentes holônicos*

O agente holônico deve ser capaz de tomar decisões autônomas, sendo, assim, inteligente. Para isso, sua capacidade de raciocínio foi modelada de acordo com os parâmetros de projeto descritos na seção 6.2.

Na figura 6.8, encontra-se o modelo adotado no sistema objeto. Conforme as necessidades da capacidade de percepção do agente, há uma base de crenças que é alimentada a partir da atualização de suas percepções. Cada decisão a ser tomada deve, então, verificar os objetivos do agente, tal qual estabelecido em sua base de intenções.

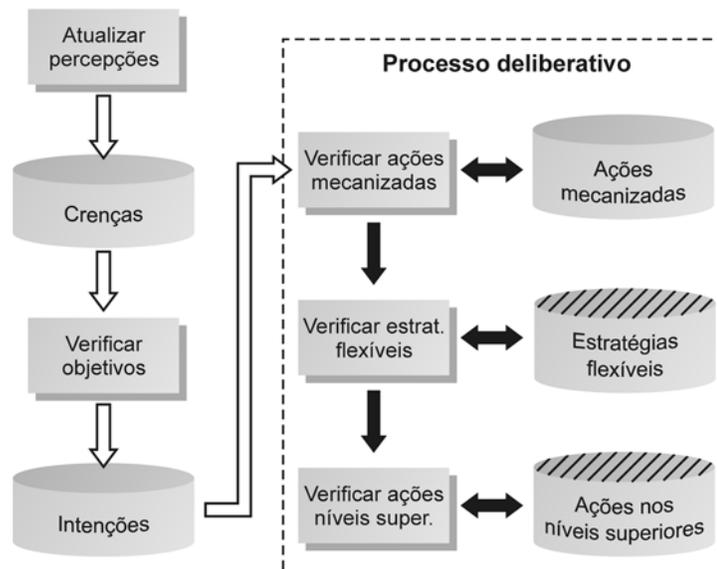


Figura 6.8: Modelo deliberativo de holon

No processo deliberativo em si, o agente verifica em uma base de ações mecanizadas se há alguma regra que define um reflexo imediato como resposta. Não havendo, níveis superiores de tomada de decisão internos ao holon são então buscados, verificando-se se, dentro de sua liberdade de ação definida em uma base de estratégias flexíveis, esse possui capacidade e autorização para lidar com essa solicitação. Não possuindo, novamente, níveis superiores devem ser, então, acionados.

## Encapsulamento dos holons

A implementação do agente holônico inteligente utilizou, ainda, o ambiente de agentes móveis, ganhando, assim, mais habilidades. Desse modo, cada holon ganhou certa mobilidade para poder mudar de um sistema para outro.

Para essa implementação, os agentes foram encapsulados em *aglets*. Para isso, além das propriedades e dos métodos comuns às classes implementadas no modelo de rede de agentes, cada objeto conta com um *proxy* de *Aglets*. O exemplo mais claro de necessidade de mobilidade é de holons de pedido, cujo encapsulamento em *um* aglet pode ser visto na figura 6.9.

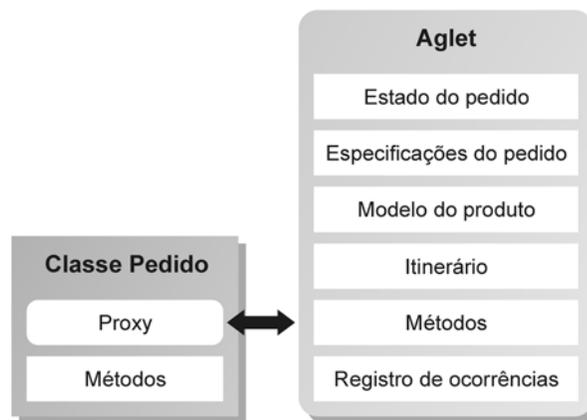


Figura 6.9: Encapsulamento de holon de pedido

Uma vez que um pedido passa por várias áreas até que todas suas necessidades sejam atendidas, o *aglet* que o encapsula deverá migrar entre vários sistemas. Inicialmente, o pedido chega no departamento de vendas, que passa pelo planejamento, pela produção, descendo em níveis hierárquicos até alcançar a operação das tarefas produtivas que darão forma a seus requisitos. Uma vez concluído, esse pedido retorna pela hierarquia até que chegue, finalmente, ao cliente.

O encapsulamento do holon de pedido considera que as seguintes informações migrarão juntamente com o agente móvel:

Estado do pedido: mostra o estado atual do agente, como, por exemplo, se esse está aguardando cotação, está em produção ou retornando para um consumidor com um produto acabado.

Especificações do pedido: indica todas as especificações referentes às necessidades do consumidor.

Modelo do produto: após o *broker* interagir com o holon de produto a partir da chegada do pedido, este passa a carregar consigo informações importantes, formando um modelo sucinto do produto.

Itinerário: aponta para as direções básicas a serem seguidas pelo holon de pedido. Essas direções são a princípio seguidas, mas podem ser alteradas a medida que holon sinta necessidade.

Métodos: é o conjunto de métodos utilizados pelo holon para realizar suas tarefas básicas, como sentir, deliberar e atuar.

Registro de ocorrências: acontecendo algum evento que mereça ser registrado, esse pode ser temporariamente armazenado nesse registro para que, tão logo o holon retorne a seu local de origem, seus dados possam ser descarregados em uma base maior.

O encapsulamento de um holon de recurso pode ser visto na figura 6.10. Essa mobilidade permite a um recurso migrar entre diferentes sistemas durante seu ciclo de vida. Assim, uma determinada máquina pode, de acordo com sua visão de novas oportunidades, migrar, ou mesmo se clonar, para outras unidades de negócio ou mesmo fábricas.

Um holon de recurso encapsulado leva consigo as seguintes informações:

Estado do recurso: indica o estado atual do agente, como, por exemplo, se esse está disponível, em operação ou em manutenção.

Lista de tarefas: é a seqüência programada das atividades a serem executadas pelo recurso.

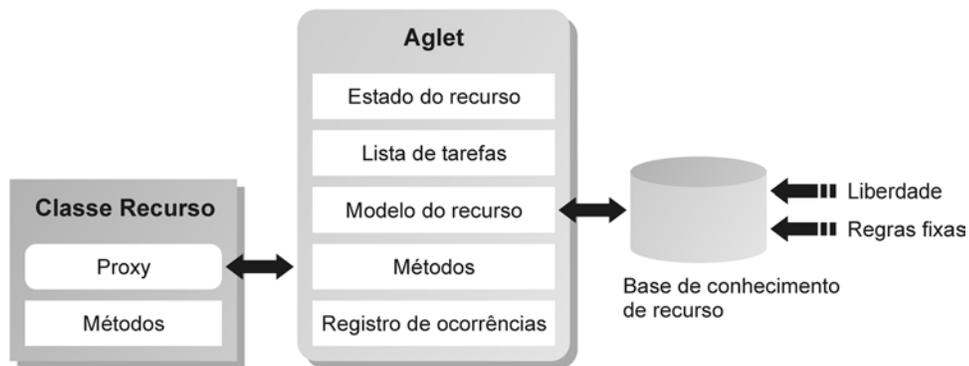


Figura 6.10: Encapsulamento de holon de recurso

Modelo do recurso: representa o recurso através de um modelo indicando como esse se comportará diante diferentes situações.

Métodos: é o conjunto de métodos utilizados pelo holon para realizar suas tarefas básicas, como sentir, deliberar e atuar.

Registro de ocorrências: acontecendo algum evento que mereça ser registrado, esse pode ser temporariamente armazenado nesse registro para que, tão logo o holon retorne a seu local de origem, seus dados possam ser descarregados em uma base apropriada.

Além dessas informações, o *aglet* associado a um recurso tem a habilidade de buscar numa base de conhecimento informações importantes, tais como quais padrões de mecanização e liberdade devem ser seguidos. Para isso, ele pode se mover para o mesmo sistema dessa base, comunicando-se de maneira mais eficiente.

Por fim, o encapsulamento de um holon de produto é mostrado na figura 6.11. Para esse, as seguintes informações são encapsuladas:

Estado do produto: indica o estado atual do agente, como, por exemplo, a versão de seu projeto, se esse está em fase de prototipagem ou se está aprovado para ser produzido.

Modelo do produto: representa o produto através de um pequeno modelo. Seu conteúdo é constantemente atualizado com a base de conhecimento de produto.

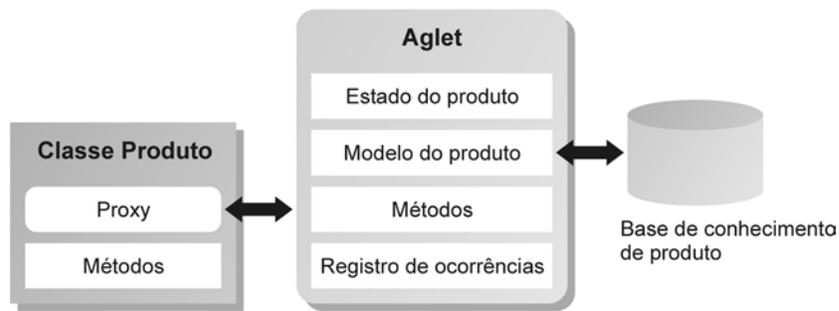


Figura 6.11: Encapsulamento de holon de produto

Métodos: é o conjunto de métodos utilizados pelo holon para realizar suas tarefas básicas, como sentir, deliberar e atuar.

Registro de ocorrências: acontecendo algum evento que mereça ser registrado, esse pode ser temporariamente armazenado nesse registro para que, tão logo o holon retorne a seu local de origem, seus dados possam ser descarregados em uma base maior.

Assim como nos holons de recurso, um *aglet* representando um produto pode se mover através de redes, aproximando-se da base de conhecimento de produto. Comunicando-se diretamente com essa, as informações necessárias podem ser obtidas e movimentadas juntamente com o holon.

Na verdade, os holons de recurso e produto são mais estacionários do que os holons de pedido. Uma vez estabelecidos em um determinado sistema, podem permanecer nesse por muito tempo. No entanto, sua capacidade de mobilidade é fundamental para sua autonomia.

### 6.2.2 Coordenação de sistemas distribuídos

Seja no planejamento, como nos processos de negociação, o sistema objeto deve prover mecanismos eficazes de coordenação de seus agentes.

O planejamento envolve a criação de planos para que os agentes distribuídos possam trabalhar como um todo, garantindo melhores índices de performance para o sistema como um todo. Tanto em situações cotidianas, quanto em eventos inusitados, o desenvolvimento desses planos deve ser ágil e flexível.

Já as eventuais negociações, utilizadas quando não há concórdia entre as vontades dos agentes, devem criar um ambiente saudável de competição. As soluções para essas discordâncias devem ser imparciais e os conflitos devem ser tratados como formas de se buscar melhores desempenhos.

### *Domínios de cooperação*

O Sistema Inteligente de Manufatura aqui proposto, retoma o conceito de domínio de cooperação utilizado pela arquitetura *HoloBloc*, conforme pôde ser visto na seção 4.4 deste trabalho. Recapitulando, um domínio de cooperação é um espaço lógico no qual holons podem se comunicar e interagir.

A figura 6.12 mostra a implementação de domínios de cooperação na rede de agentes. Através de uma classe domínio, é possível que diferentes domínios de cooperação possam ser representados em um único modelo. Em cada domínio, conjuntos de recursos de domínios inferiores podem ser acessados no lugar recurso.

Como exemplo, um pedido entra no holon fábrica através do domínio de cooperação fábrica. Seu *broker* tem a sua disposição um conjunto de recursos chão-de-fábrica, dentre os quais, pelo menos um será capaz de atender ao pedido. Cada

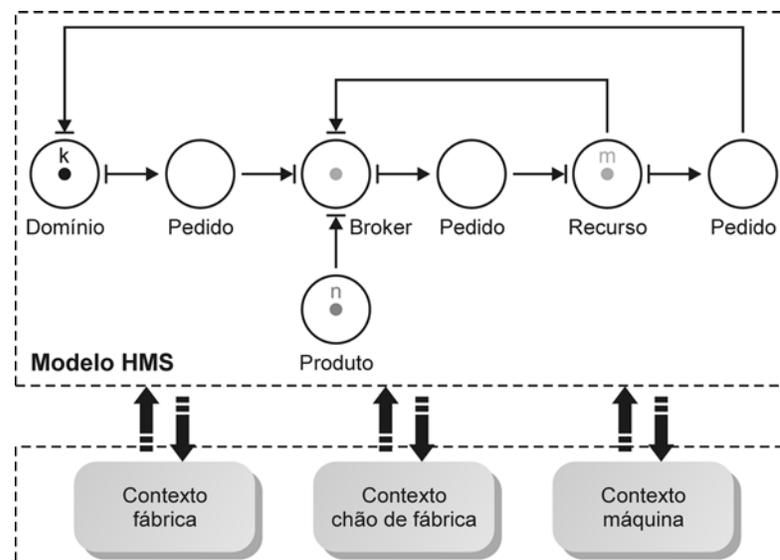


Figura 6.12: Implementação de domínios de cooperação

recurso chão-de-fábrica, por sua vez, possui um domínio de cooperação próprio, para o qual o pedido pode ser enviado. Nesse, há um *broker* que interage com seus recursos máquina.

Para cada domínio de cooperação, há um contexto *Aglet* associado. Esse contexto é responsável por uma representação virtual do espaço de trabalho onde os holons de um domínio de cooperação cooperam.

Ainda, assim como os recursos, holons de produto também possuem domínios de cooperação. Esses servem para a alocação de seus agentes móveis, gerenciando, ainda, sua operação.

### *Holon de programação*

O planejamento de agentes holônicos adotado para o Sistema Inteligente de Manufatura proposto nesta tese se baseia na hierarquização de hábitos e improvisações proposta na seção 3.5.1 deste trabalho. De acordo com a complexidade do plano a ser formulado, um holon pode adotar um plano global, vindo de um programador que visualiza o sistema como um todo e, assim, otimiza o desempenho global, ou pode processar seu próprio plano, o qual, sendo local, maximiza a performance do holon isoladamente.

Para isso, o modelo HMS proposto prevê a alocação de holons de suporte. Na figura 6.13, pode-se ver a adoção de um holon programador, o qual apóia seu subsistema para o alcance de melhores programações locais. Assim, sempre que houver necessidade, o holon pode aproveitar-se da maior especialidade desse seu holon de suporte.

A implementação de holons de suporte é facilitada pela capacidade do ONTOOL de anexar classes externas. Novas capacidades, como o holon programador, podem ser vinculadas ao modelo, melhorando, desse modo, sua flexibilidade e agilidade e dando a esse menor tempo de resposta.

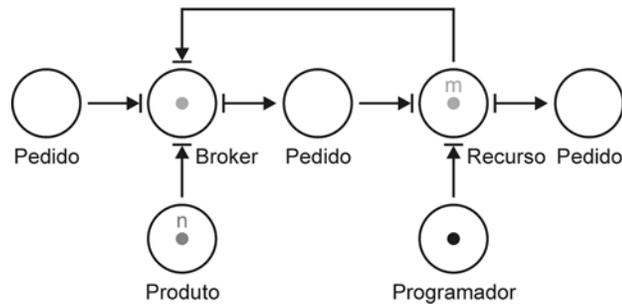


Figura 6.13: Exemplo de holon de suporte: o holon programador

### *Protocolos de negociação*

A adoção de protocolos de negociação deve considerar esses e demais aspectos que caracterizam cada nível de cooperação. Em cada nível de cooperação, as competências, bem como as medidas de desempenho que a avaliam, se alteram. Essas são mais quantitativas e determinísticas nos níveis mais operacionais, sendo mais qualitativas e menos determinísticas nos níveis estratégicos.

Para os níveis mais operacionais do sistema objeto, adotou-se um protocolo de negociação baseado na Rede de Contratos [Smith, 1980], tal qual mostrado na figura 6.14. Busca-se, assim, as melhores competências, através de um mecanismo baseado no processo tradicional de troca de bens e serviços: a partir das solicitações de um contratante para outros agentes, propostas são elaboradas por estes e a tarefa é atribuída ao agente mais conveniente (geralmente aquele com o custo mais satisfatório).

As medidas de desempenho adotadas como critério de avaliação para negociações no sistema objeto se baseiam no modelo do AARIA [Parunak, 1998]. Nesse, a partir de um pedido feito a um determinado agente, suas especificações descem pela hierarquia da cadeia de fornecimento até os níveis mais baixos dos fornecedores primários.

Partindo desses níveis mais baixos, em um processo da base para o topo da hierarquia da cadeia de suprimentos, cada agente interessado responde com uma curva representando a relação entre o tempo de entrega e seu custo para atender ao

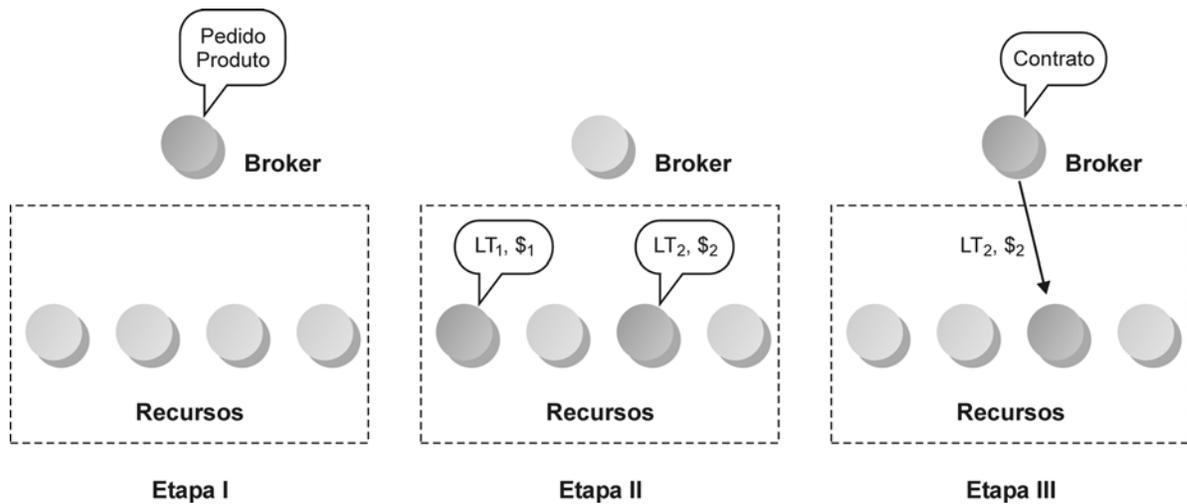


Figura 6.14: Protocolo de negociação baseado em Rede de Contratos

pedido. Para esse cálculo, um agente deve considerar sua programação de atividades e qual é o custo para que remanejamentos e eventuais descumprimentos de suas obrigações sejam efetuados. Quanto maior o tempo para atender ao pedido, menor o custo. Mas, para horizontes curtos de entrega, muitas re-alocações de atividades são necessárias, aumentando, assim, seu custo.

Com base nas respostas de seus fornecedores, cada nível pode compor sua própria relação, enviando-a para o nível imediatamente superior. No final, chega ao consumidor final uma cotação contendo a relação de tempo de entrega com custo para que suas necessidades sejam atendidas.

Uma vez selecionado o ponto que melhor lhe atende, essa seleção se propaga novamente do topo para a base da hierarquia da cadeia de suprimentos. Chegando ao fornecedor primário, o processo produtivo pode, então, ser iniciado conforme a programação previamente estabelecida.

Em uma implementação real, um número maior de medidas de desempenho pode ser utilizado como critério de avaliação em um processo de negociação. No entanto, deve-se avaliar o custo operacional desse aumento de complexidade.

### 6.2.3 *Parâmetros organizacionais*

Autonomia e cooperação não são suficientes para que o sistema objeto atinja seus requisitos enquanto Sistema Inteligente de Manufatura. O resultado obtido em sua implementação deve ser um sistema que haja como um conjunto coerente, com a essência de uma sociedade bem sucedida. Indo de acordo com as indicações do paradigma holônico, bem como as previsões feitas em Van Leeuwen & Norrie (1997), o Sistema Inteligente de Manufatura proposto deverá formar, de maneira distribuída, fábricas virtuais e re-configuráveis, integrando, para isso, pessoas, máquinas e conhecimento.

Os parâmetros organizacionais são justamente os responsáveis por fornecerem esse conjunto ao sistema. Enquanto a estrutura organizacional garante que o comportamento social necessário seja baseado em uma holarquia, os parâmetros de comunicação proporcionam os canais de interação entre seus indivíduos.

#### *Estrutura organizacional holônica*

A estrutura organizacional holônica pode ser considerada como consistindo de cadeias escalares de entidades holônicas. Nessa estrutura, qualquer entidade que seja tomada de referência se sujeita como parte de um nível mais elevado e contém subsistemas de níveis mais baixos [Mathews, 1995]. Ainda, a cada nível dessa estrutura, tarefas são alocadas a seus holons, seguindo, para isso, seu processo de coordenação. Embora *brokers* sejam responsáveis pela busca de oportunidades e distribuição das tarefas, fornecendo certa dependência entre os elementos do sistema, e domínios de cooperação criem espaços para que interações ocorram, a estrutura organizacional holônica necessita de algo a mais: concatenação e coerência.

Ponto fundamental para essa estrutura é a auto-similaridade dos holons. Para sua implementação, foi adotado o modelo sugerido por Wyns (1999), o qual pode ser visto na figura 6.15. Esse modelo mostra que, além da similaridade natural de indivíduos de um mesmo nível que descendem de uma mesma classe, holons propagam semelhanças para verticalmente nessa estrutura. Assim, tanto o Sistema

Holônico de Manufatura (HMS) quanto uma máquina como um torno, por exemplo, são holons de recurso que herdaram diversas semelhanças.

Como principal benefício, auto-similaridade leva a uma maior homogeneidade do sistema, o que facilita, por sua vez, a re-configuração do sistema. Além da auto-similaridade, outra capacidade que pode ser visualizada nessa figura é a recursividade dos holons: à medida que holons são levados para dentro de holons, num ciclo contínuo em busca de determinados objetivos, processos recorrentes se formam.

Ainda, há a questão da re-configuração em si. Uma vez implementada essa estrutura auto-similar e recursiva, o sistema deve facilitar a entrada e saída de elementos. Para isso, eventos especiais foram criados na rede de agentes para que a entrada e a saída de agentes pudessem ser detectadas. Assim, quando um *aglet* chega a um domínio de cooperação, o modelo HMS detecta sua chegada e, sendo essa uma configuração viável, cria os objetos necessários.

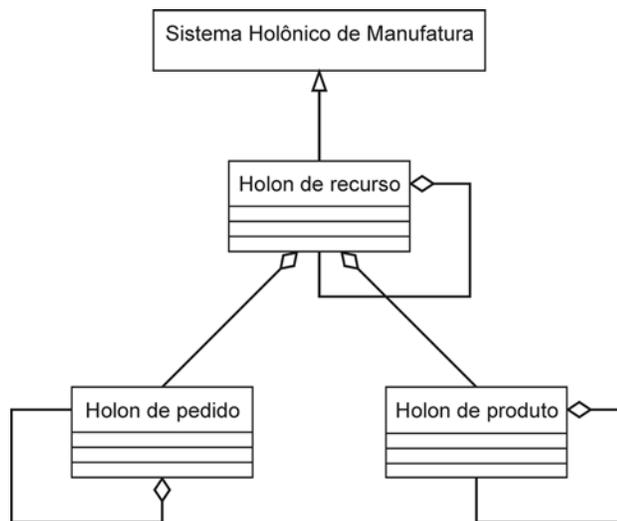


Figura 6.15: Auto-similaridade e recursividade dos holons [Wyns, 1999]

### *Comunicação e cooperação*

Embora existam diversas analogias entre os modelos de comunicação utilizados em Sistemas Multiagentes e aqueles mais comumente encontrados em redes computacionais tradicionais, distinções expressivas fazem com que alguns cuidados devam ser tomados.

Como exemplo, quando um protocolo de rede é tradicionalmente especificado, busca-se a completa definição dos possíveis estados de transição, os quais são normalmente definidos por tabelas de estados. Então, um nó nessa rede pode simplesmente utilizar um procedimento de busca para determinar suas próximas ações. Vê-se, assim, que não há nenhum escopo para flexibilidade e aleatoriedade nesses protocolos.

Por outro lado, um Sistema Multiagente precisa de protocolos flexíveis. A habilidade de tomar decisões em ambientes complexos, incertos e dinâmicos não pode ser restringida por protocolos rígidos. O não determinismo é, portanto, um componente necessário de um “bom” protocolo de cooperação para Sistemas Multiagentes.

Basicamente, o sistema objeto utiliza o modelo de comunicação fornecido pelo *Aglet API*. Nesse, existe o transporte de mensagens e dos próprios *aglets* através da rede.

A comunicação entre *aglets* acontece através de trocas flexíveis de mensagens. Esse mecanismo é baseado em um esquema de eventos simples, os quais estabelecem a implementação de processadores para que determinadas mensagens possam ter seu contexto reconhecido. De fato, uma mensagem é um objeto caracterizado por um tipo, ao qual podem ser atribuídos valores (figura 6.16).

Para o transporte de *aglets*, o *Aglet API* utiliza uma camada de comunicação genérica: a API de comunicação. Baseado nos padrões OMG (*Object Management Group*) da MASIF (*Mobile Agent System Interoperability Facility*), o API de comunicação

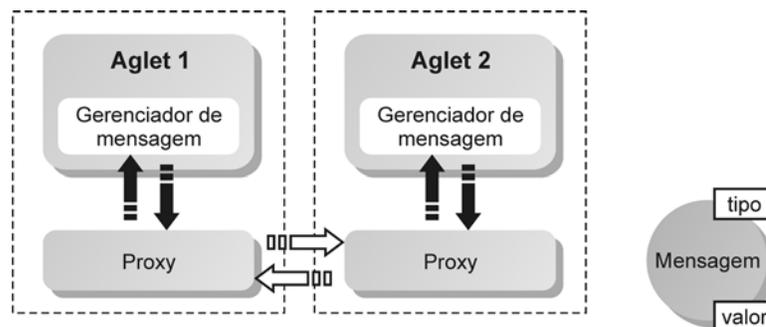


Figura 6.16: Serviço de mensagem baseado no *Aglet API*

possibilita a interação de vários sistemas de agentes. Essa aplicação abstrai a camada de comunicação através da definição de interfaces, fornecendo, ainda, um padrão para a representação de dados. Embora essa não seja uma verdadeira interface CORBA, é possível a implementação de aplicações que utilizem objetos MASIF.

A implementação da API de comunicação para *aglets* emprega, ainda, o *Protocolo de Transferência de Aglets* (ATP). Trata-se de um protocolo de internet modelado sobre o protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), sendo utilizado tanto para o transporte de *aglets* como para os serviços de troca de mensagens entre esses.

O ATP foi projetado para transmitir agentes e mensagens independentemente do sistema sendo utilizado. Embora sua implementação possa ser feita através de uma simples instância de uma classe, aplicativos específicos podem ser desenvolvidos para monitorar e controlar a operação e o fluxo de *aglets* em uma rede.

### **6.3 Integração do sistema objeto**

O modelo básico de agente pode agregar diversas funções de uma organização virtual. Interligando desde níveis estratégicos até suas operações, o Sistema Multiagentes proposto tem a função de flexibilizar e dar maior agilidade quando ambientes produtivos e heterogêneos são integrados. É o desenvolvimento de uma rede de competências na direção de um Sistema Inteligente de Manufatura.

No entanto, essa captura de diferentes funções não é uma tarefa fácil. Embora o sistema objeto tenha sido projetado para funcionar em diversas plataformas, a essência de cada indivíduo dessa rede apresenta diferenças muito mais difíceis de lidar: trata-se da cultura de cada empresa, seu modo de trabalho, suas políticas e valores.

No contexto tecnológico, este trabalho buscou algumas soluções para problemas concretos. Através da exploração da rede de agentes e do ambiente de agente móveis, interações puderam ser modeladas e implementadas. Assim, diferentes funções podem ser integradas e seus processos coordenados pelo Sistema Inteligente de Manufatura.

Em um modelo HMS, cada domínio de cooperação está associado a um contexto *Aglet* e, com isso, a um servidor de agentes móveis. Esses contextos são utilizados

tanto para a interação entre modelos como para a integração de um modelo com a função a que ele se refere. Alguns exemplos dessa implementação podem ser encontrados nas subseções seguintes.

### 6.3.1 Integração com os sistemas operacionais

Nos domínios de cooperação de níveis mais baixos, equipamentos operacionais como máquinas e seus dispositivos são integrados ao Sistema Inteligente de Manufatura por meio de contextos locais. Essa integração é mostrada na figura 6.17.

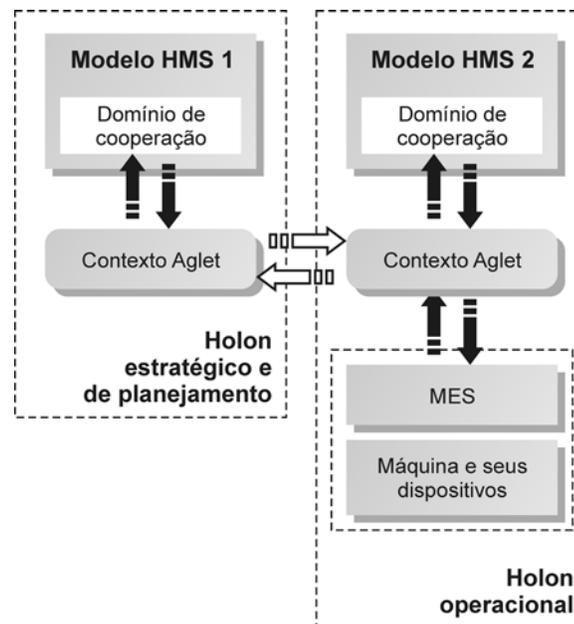


Figura 6.17: Integração de holon operacional

Embora a implementação proposta considere a existência de um Sistema Executivo de Manufatura (MES) [O'Brien, 2003], pode-se, ainda, explorar os benefícios do paradigma holônico, implementando holicamente funções operacionais através da arquitetura *HoloBloc*. Com isso, tanto as funções de controle quanto as de supervisão podem ser desenvolvidas utilizando-se blocos de função e os domínios de cooperação adequados.

De forma independente com a plataforma de implementação desse sistema executivo, a troca de informações entre esse sistema e o contexto *Aglet* pode acontecer através de *Java RMI*, *Corba* ou XML.

### 6.3.2 Integração com os recursos humanos

Funções importantes a serem integradas ao sistema proposto são aquelas que dependem de recursos humanos. Novamente através da implementação de contextos adequados, essa integração se torna possível (figura 6.18).

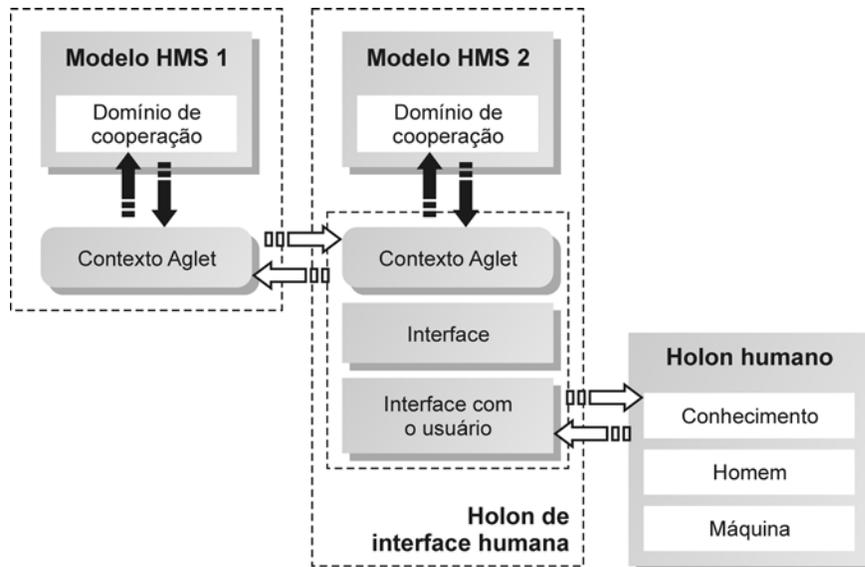


Figura 6.18: Integração com recursos humanos

Recorda-se que a definição para Sistema Inteligente de Manufatura que esta tese defende é baseada na correta organização de diferentes indivíduos, de modo a formar um sistema mais capaz. Nesse contexto, as habilidades dos recursos humanos como adaptabilidade e capacidade criativa, muitas das quais jamais poderão ser simuladas por qualquer máquina, se tornam fundamentais.

No paradigma holônico, um processo humano envolve, naturalmente, o homem e a máquina, mas acrescenta-se a esse a infraestrutura computacional adequada para que se tenha acesso a todo o conhecimento necessário. Com isso, o recurso humano se integra ao Sistema Inteligente de Manufatura, a seus mecanismos e protocolos.

No entanto, nenhum trabalhador ou operador pode ser tratado como um recurso comum executando um processo. A interface humana, embora possa ser considerada um holon de recurso, requer tecnologias específicas para que interações com usuários sejam modeladas de maneira adequada.

### 6.3.3 Integração com os sistemas legados

Além do Sistema Executivo de Manufatura (MES), outros sistemas legados podem ser integrados ao Sistema Inteligente de Manufatura, conforme mostrado na figura 6.19.

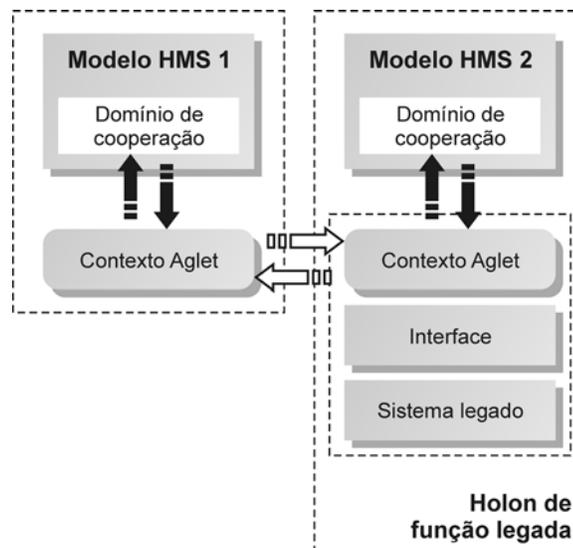


Figura 6.19: Integração com sistemas legados

A formação de uma organização virtual envolve a integração de empresas já estabelecidas, cada qual com seus sistemas próprios. Muitas das informações a serem compartilhadas estão em Sistemas de Informação como o Planejamento de Recursos da Empresa (ERP), Gerenciamento da Cadeia Logística (SCM) e o Gerenciamento das Relações com Clientes (CRM) [O'Brien, 2003]. Esses são sistemas legados, que tiveram seus custos de implantação e operação, e obrigar essas empresas a migrarem ou duplicarem suas bases para uma plataforma própria do Sistema Inteligente de Manufatura é algo certamente inviável.

Assim, uma grande vantagem do ambiente utilizado para implementação do sistema objeto é sua facilidade de integração com sistemas em plataformas heterogêneas. Para isso, utilizam-se interfaces que fazem a comunicação entre o contexto do modelo HMS que representa uma determinada função e o sistema que detém as informações e os processos necessários.

#### 6.3.4 Integração com modelos virtuais

Modelos virtuais podem ser anexados ao Sistema Inteligente de Manufatura, tal qual mostrado na figura 6.20.

Inicialmente, essa integração foi fundamental para que testes pudessem ser feitos no sistema objeto. Notou-se, em seguida, que o teste de sistemas hipotéticos é também bastante útil para que novas situações possam ser testadas durante a operação do sistema.

Assim, cria-se um ambiente de apoio a tomada de decisão, onde algumas das eventuais dúvidas operacionais que surgem podem ser simuladas, aumentando-se a confiabilidade nas decisões tomadas.

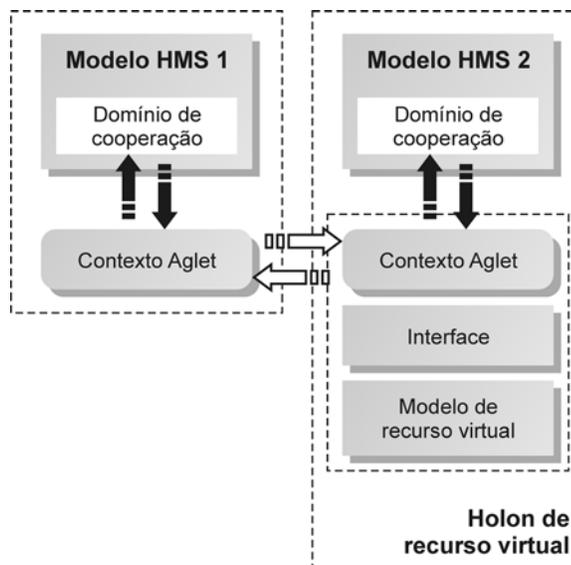


Figura 6.20: Integração com recursos humanos

## 6.4 Desempenho de projeto do sistema objeto

Sumarizando, os requisitos funcionais e parâmetros de projeto obtidos para o desenvolvimento do Sistema Inteligente de Manufatura proposto após as sucessivas decomposições podem ser encontrados na figura 6.21. Nas seções anteriores, foi possível observar como essa estrutura pôde ser aplicada no projeto do sistema objeto, transportado-os para o domínio de processo. Resta, no entanto, saber se o resultado obtido é adequado ou não.

### Requisitos funcionais

- FR1 = Projetar um sistema ágil
  - FR11 = Conter elementos autônomos
    - FR111 = Ser sensível com seu ambiente
      - FR1111 = Lidar com interações de entrada
      - FR1112 = Prospectar novas oportunidades
    - FR112 = Tomar decisões adequadas
      - FR1121 = Transformar informação em conhecimento
      - FR1122 = Ser orientado a objetivos
      - FR1123 = Lidar com interações de saída
    - FR113 = Atuar no sistema
      - FR1131 = Atuar em ambientes estáticos
      - FR1132 = Atuar em ambientes dinâmicos
  - FR12 = Agregar elementos cooperativos
    - FR121 = Coordenar agentes não antagônicos
      - FR1211 = Planejar em ambientes estáticos
      - FR1212 = Planejar em ambientes dinâmicos
    - FR122 = Coordenar agentes antagônicos
      - FR1221 = Ser imparcial nas decisões
      - FR1222 = Solucionar conflitos
  - FR13 = Possibilitar comportamento social
    - FR131 = Ser uma holarquia
      - FR1311 = Ser um sistema modular
      - FR1312 = Ser re-configurável
      - FR1313 = Integrar diversos níveis
    - FR132 = Possibilitar a interação de agentes
      - FR1321 = Possibilitar a comunicação entre agentes
      - FR1322 = Criar um ambiente cooperativo

### Parâmetros de projeto

- DP1 = Sistema holônico
  - DP11 = Agentes holônicos inteligentes
    - DP111 = Capacidade de percepção
      - DP1111 = Mecanismos de filtro
      - DP1112 = Interm. de oportunidades (*broker*)
    - DP112 = Capacidade de raciocínio
      - DP1121 = Crenças
      - DP1122 = Desejos
      - DP1123 = Mecanismos de gatilho
    - DP113 = Capacidade de atuação
      - DP1131 = Ações mecanizadas
      - DP1132 = Estratégias flexíveis
  - DP12 = Coordenação de sistemas distribuídos
    - DP121 = Planejamento distribuído
      - DP1211 = Planejamento hierárquico
      - DP1212 = Planejamento heterárquico
    - DP122 = Mecanismos de negociação
      - DP1221 = Critérios de avaliação
      - DP1222 = Protocolos de negociação
  - DP13 = Parâmetros organizacionais
    - DP131 = Estrutura organizacional
      - DP1311 = Agentes auto-similares
      - DP1312 = Sistema aberto
      - DP1313 = Agentes recursivos
    - DP132 = Modelo de comunicação
      - DP1321 = Serviços de mensagem
      - DP1322 = Protocolos de cooperação

Figura 6.21 – Sumário da Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD)

Embora o desenvolvimento de medidas quantitativas para a avaliação de projeto não tenha sido foco desta tese, é possível analisar o resultado obtido. Para isso, a matriz de projeto foi aplicada e comparada com a situação ideal apresentada na seção 5.3.3. Seu resultado pode ser encontrado na matriz de projeto da tabela 6.1.

Comparando-se a matriz de projeto obtida para o Sistema Inteligente de Manufatura aqui desenvolvido com o modelo ideal apresentado na seção 5.3.3 deste trabalho é possível inferir algumas conclusões sobre seu comportamento. A análise das dependências entre requisitos funcionais e parâmetros de projeto leva à previsão das relações que poderão dificultar o alcance das necessidades do sistema objeto.

Alguns desacoplamentos são requisitos para o sucesso do sistema. Por exemplo, o fato de um sistema ser aberto pode até dificultar sua coordenação, mas o projeto desse sistema deve ser tal que faça com que sua re-configurabilidade não afete seus processos de planejamento e negociação. Do mesmo modo, serviços de mensagem são fundamentais para muitas funções do sistema, mas esse deve passar despercebido em sua operação.

Tabela 6.1: Matriz de projeto para o sistema objeto

	DP111	DP112	DP121	DP122	DP123	DP131	DP132	DP121	DP122	DP121	DP122	DP131	DP132	DP133	DP1321	DP1322
FR1111	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR1112	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR1121	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR1122	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR1123	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR1131	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR1132	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR1211	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
FR1212	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0
FR1221	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0
FR1222	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0
FR1311	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0
FR1312	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0
FR1313	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0
FR1321	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
FR1322	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X

No entanto, outros relacionamentos não puderam ser desacoplados. Conforme os princípios do Projeto Axiomático [Suh, 1990], isso significa que o projeto deixa de ser ideal.

Os mecanismos de filtro do agente, responsáveis por suas interações de entrada, influenciam, também, a prospecção de novas oportunidades e a transformação de informação em conhecimento. O intermediário de oportunidades é responsável direto pela busca dessas oportunidades, mas, sem um sistema de filtro adequado, seu trabalho não se torna eficaz. Além disso, as crenças do agente são, do mesmo modo, afetadas pela maneira como essa interação ocorre.

Algumas relações acopladas estão relacionadas ao encadeamento que faz com que um agente gere reações pró-ativas a partir de informações externas. Esse agente, sendo orientado a objetivos, utiliza suas crenças para avaliar o alcance de suas metas. A partir dessa avaliação, processos deliberativos ocorrem para definir as interações de saídas mais adequadas. Estas, por sua vez, geram a ação necessária através de mecanizações ou estratégias flexíveis.

Além disso, mesmo sendo a imparcialidade um requisito capital para que o sistema se beneficie de negociações, a forma como os pontos de equilíbrio são encontrados depende dos desejos do agente. E uma vez selecionada maneira de encontrar esse ponto, todo o processo de solução de conflitos deve estar condicionado a essa decisão.

Por fim, a auto-similaridade é ponto importante para o alcance de um sistema re-configurável e para a integração dos níveis do sistema. Ser re-configurável significa que o sistema é modular, o que somente é possível graças a essa semelhança vertical entre todos e partes. Ainda, a integração, derivada da recursividade, é por si só uma introspecção dessas analogias estimuladas.

Uma análise, mesmo que tácita, mostra que, embora haja diferenças entre a matriz de projeto ideal e esta obtida para o sistema objeto, o número de acoplamentos pode ser considerado baixo. Além disso, o número de elementos resultante também pode ser considerado razoável. Portanto, na visão de seu contexto de projeto, a

probabilidade de sucesso do Sistema Inteligente de Manufatura pode ser considerada satisfatória.

## Capítulo 7

### Conclusões e Comentários Finais

#### 7.1 Conclusões

Esta tese é uma tentativa de se despertar a sociedade para os desafios da Economia Digital e, sobretudo, mostrar que iniciativas devem ser tomadas para que esses desafios possam ser enfrentados. Seus resultados servem para a reflexão de administradores públicos, empresários, diretores, gerentes, engenheiros, pesquisadores e outros profissionais que tenham preocupação com o futuro de suas instituições.

Mercados, assim como desejos de consumidores, crescem na mesma proporção em que se tornam mais voláteis. As concorrências ocorrem em rinhas cada vez mais globalizadas e os avanços científicos mostram perspectivas tecnológicas surpreendentes para um futuro próximo. E resta a qualquer empresa, sem margens para que decisões erradas sejam tomadas, manter elevados seus padrões de competitividade.

Defendeu-se nesta tese que, diante desse cenário, um sistema de manufatura deve ser inteligente para ser bem sucedido. A autonomia, a cooperação e a organização foram apontadas como as propriedades essenciais, sendo sua compreensão e aplicação diferenciais que devem alavancar melhores posições para quem as pratica. E, no sentido de contribuir para o desenvolvimento de Sistemas Inteligentes de Manufatura, espera-se que este trabalho tenha alcançado seus objetivos, sendo considerado, portanto, bem sucedido.

A definição dos conceitos fundamentais apresentada em seu começo foi necessária para seu embasamento teórico. Com a preocupação de que os principais pesquisadores e as mais importantes obras fossem tomados como referência, houve o

esmero de se corroborar cada afirmação feita. Mas isso somente foi possível, graças a uma árdua pesquisa bibliográfica em Engenharia de Manufatura e Inteligência Artificial. Investigar, compreender e reproduzir os trabalhos realizados pelos principais centros de pesquisa do mundo ajudou no desenvolvimento do conhecimento e da capacitação prática necessários para a realização desta tese.

Essa etapa de pesquisa foi, ainda, capital para situar os desenvolvimentos aqui propostos tomando o cenário científico internacional como referência. Com isso, foi possível validar a abordagem proposta e direcionar os esforços na busca de paradigmas inovadores. Exemplo pode ser dado nos estudos dos trabalhos da *Katholieke Universiteit Leuven*, na Bélgica, cujos resultados comprovam a viabilidade de se aplicar o paradigma holônico em sistemas de manufatura [Valckenaers, 1998; Wyns, 1999].

Fator importante para a elaboração desta tese foi, ainda, a utilização da Postura Intencional [Dennet, 1987] e sua passagem pelas ciências não tecnológicas. O estudo do desenvolvimento da inteligência humana [Binet & Simon, 1905], a compreensão da evolução de uma sociedade [de Beauvoir, 1948] e o melhor entendimento sobre o comportamento de aves [Tinberger, 1964], além de serem obras clássicas que culturalmente enriquecem qualquer trabalho, se tornaram metáforas, fontes de inspiração e peças chaves para a busca de novas soluções. Sem essas, os desenvolvimentos realizados neste trabalho não seriam possíveis.

Uma vez montada sua base teórica, esta tese se confrontou com a transição dos conceitos abordados para um ambiente industrial, no qual as tecnologias necessárias deviam ser estudadas e apresentadas. E novamente o papel da pesquisa se mostrou fundamental. Para tanto, este trabalho apresentou uma base tecnológica para a implementação de um Sistema Inteligente de Manufatura. Embora esteja longe de ser completo, tal qual poderá ser visto nos trabalhos futuros a serem sugeridos neste capítulo, o conteúdo deste trabalho pode ser tomado como referência para o desenvolvimento de sistemas holônicos.

Como resultado, seu principal desenvolvimento foi a Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD). Enquanto estrutura de projeto trata-se de uma

metodologia para apoiar o projeto de um Sistema Multiagentes [Huhns & Stephens, 1999] que esteja de acordo com o paradigma holônico, mantendo, para isso, a coerência entre os princípios desse paradigma e garantindo que os requisitos funcionais levantados para Economia Digital sejam atendidos.

Para melhorar o discernimento sobre a metodologia proposta, essa foi aplicada no projeto de um Sistema Inteligente de Manufatura. A partir da adoção de um ambiente formado pela rede de agentes [Gudwin, 1996] e por agentes móveis [Lange & Oshima, 1999], os requisitos funcionais desse sistema foram transformados em parâmetros implementáveis de projeto. Embora não fosse objetivo deste trabalho a operacionalização em si desse sistema, a aplicação dos princípios de Projeto Axiomático [Suh, 1990] mostrou que seu desempenho pode ser considerado adequado para os anseios do sistema proposto.

No entanto, essa avaliação, feita sem maiores rigores formais, não mostrou com exatidão a performance desse sistema. A simples análise da matriz de projeto não é suficiente para inferir a qualidade real do sistema sendo projetado. Assim, mesmo que a implementação de protótipos possa confirmar os resultados obtidos, um maior formalismo deve ser aplicado na mensuração de desempenho de um sistema projetado pela metodologia proposta, tal qual será sugerido nos trabalhos futuros descritos neste capítulo.

### *7.1.1 A validade da metodologia adotada*

O projeto de um Sistema Inteligente de Manufatura, uma vez habilitado através de um Sistema Multiagentes, é uma tarefa complexa e que requer alguns cuidados. Os modos de interação propostos por Werner (1991) ajudam não apenas a entender essa complexidade, mas também mostram caminhos para sua correta execução. Definindo seus agentes internos e externos e sabendo compor o sistema objeto, interações compatíveis com a teoria adotada para o sistema em questão podem ser mais facilmente definidas, especificadas e, principalmente, obtidas.

Essas particularidades levantadas por Werner (1991) foram fundamentais para o entendimento da complexidade do sistema sendo projetado. Mas essas não direcionavam para a maneira como o paradigma holônico poderia ser empregado nesse

processo, adotando-se, assim, uma metodologia baseada no Projeto Axiomático [Suh, 1990]. No entanto, ficou claro desde o início deste trabalho que se trata de uma metodologia controversa nos ambientes científicos.

Na verdade, a tentativa de Suh (1990) em utilizar uma abordagem científica para conduzir atividades de projeto pode ser considerada ambiciosa e audaciosa. Existem certas controvérsias nos axiomas defendidos pelo Projeto Axiomático, colocando à prova sua repetitividade e a universalidade, fundamentos de qualquer resultado científico. Pode haver, ainda, críticas dizendo que o domínio e as tarefas de projeto são muito amplas para poderem ser abstraídas por qualquer axioma.

Diante dessa possibilidade, mas não sendo intenção desta tese entrar na discussão sobre o formalismo utilizado na teoria do Projeto Axiomático, é importante ressaltar os benefícios obtidos neste trabalho com sua aplicação. Para desenvolver um ambiente que considerasse cada um dos elementos necessários, os quais foram levantados a partir dessa análise dos modos de interação, os princípios dessa metodologia de projeto se mostraram bastante eficazes.

A Decomposição de Projeto para Sistemas Holônicos (HSDD) atendeu ao objetivo proposto de desenvolver uma metodologia que garantisse que o Sistema Inteligente de Manufatura a ser projetado realmente estivesse de acordo com o paradigma holônico. Através de sua estrutura foi possível não apenas levantar quais são os elementos que compõe esse sistema, mas também entender de que maneira o paradigma holônico suporta a definição e a especificação de cada um desses.

Voltando àqueles que são adversos à metodologia utilizada nesta tese, Wyns (1990) aponta para a questão de que o Projeto Axiomático é limitado por considerar o processo de projeto como um problema estático: um conjunto fixo de requisitos funcionais, restrições e ambiente. Ainda, seus princípios não apontam para maneiras de se lidar com as incertezas de determinados requisitos funcionais. Com isso, alterar um requisito situado numa posição elevada na estrutura significaria a alteração de todos os ramos que estão abaixo desse. Assim, sua oposição se baseia na rigidez que faz com a re-configuração da estrutura de projeto não seja ágil.

No entanto, esta tese trabalhou com a hipótese de que, assim como um sistema holônico, o projeto é uma estrutura hierárquica. Em seus níveis mais baixos, encontram-se os parâmetros de projeto a serem implementados, sendo esses altamente influenciados pelas variações ambientais. Assim, suas decisões devem ser feitas sob demanda, i.e., essas são tomadas apenas no momento em que são realmente necessárias. Como exemplo, toma-se a seleção de um sistema para planejar de forma autônoma as tarefas de manutenção de um certo centro de usinagem. Se esse sistema for especificado antecipadamente, mudanças ambientais poderão torná-lo obsoleto e menos eficaz quando realmente se fizer necessário.

Já os níveis mais elevados dessa estrutura são mais abstratos e menos percíveis. Tomando-se a estrutura básica apresentada na seção 5.3 deste trabalho, pode-se verificar que a velocidade necessária para lidar com as incertezas que casualmente venham a alterar sua configuração pode ser considerada irrelevante. Por exemplo, o aparecimento de uma nova teoria sobre Inteligência Artificial poderia demonstrar que a centralização é na realidade a melhor maneira de se alcançar sistemas inteligentes. Mas, até que essa teoria alcance sua maturidade e tecnológica, derrubando a base de toda estrutura de projeto, houve tempo suficiente para que as mudanças necessárias em toda estrutura de projeto ocorressem.

Assim, para o contexto onde esta tese se encontra, no qual há a intenção de se apoiar desde a concepção até o projeto desse sistema, os benefícios obtidos foram satisfatórios. Portanto, a metodologia adotada pode ser considerada válida.

### *7.1.2 Preocupações com a realidade brasileira*

Uma particularidade do atual contexto das pressões tecnológicas causadas pela economia digital é que ninguém está livre de seus efeitos. Desde grandes corporações até pequenos fornecedores de serviço devem estar atentos à concorrência que pode vir de milhares de quilômetros de distância através da Internet. Ainda, esse cenário não escolhe continente ou taxa de crescimento econômico: seja uma empresa em um país desenvolvido ou em outro emergente, a Economia Digital é fator influente para que suas ações sejam bem sucedidas.

Uma das motivações que levou ao início deste trabalho de pesquisa foi colocar o Brasil no contexto dos vários desenvolvimentos científicos e tecnológicos apresentados nesta tese. Em alguns dos paradigmas apresentados, como a Empresa Virtual (VE), vários centros nacionais de pesquisa e desenvolvimento vêm apresentando trabalhos muito significativos. Mas em outros, com a especial preocupação nas inovações geradas pelo Consórcio Internacional de IMS [IMS16, 2003], existe uma defasagem marcante.

Ted Goranson apresenta as particularidades da utilização de tecnologias aplicadas a Empresas Virtuais em relação a economias emergentes, dando ênfase especial ao estudo de casos de problemas brasileiros. O Brasil é apontado como um país atrativo para esse tipo de tecnologia devido a [Goranson, 2000]:

- O Brasil possui um setor automotivo muito robusto, basicamente concentrado em uma única região.
- O Brasil é apontado como um potencial fenômeno de alta tecnologia em manufatura, sobrepondo o que os próprios americanos chamam de “*Yankee ingenuity*”.
- O sistema legal brasileiro é mais moderno que o americano e o europeu, possibilitando a adequação às necessidades de uma Empresa Virtual.
- O Brasil possui canais para se conseguir apoio de bancos e outros órgãos internacionais.
- Já existe uma infraestrutura de laboratórios, sobretudo em Universidades, e um sistema de empresas incubadoras compatíveis com as tecnologias necessárias.

No sentido de apoiar essas colocações, o Brasil tem participado com importantes contribuições para o desenvolvimento de Empresas Virtuais [Fraga et al., 2003; Franco & Batocchio, 2000; Bremer et al., 1999; Rabelo & Camarinha-Mattos, 1996].

No entanto, pouco apoio vem sendo dado a iniciativas relacionadas ao Consórcio Internacional de IMS, uma vez que há uma carência em investimentos de projetos internacionais por parte das agências de fomento e Universidades brasileiras. Nesse contexto, os trabalhos realizados no país vêm ocorrendo de maneira isolada, sem uma

participação mais efetiva junto à cúpula do consórcio. Como consequência, o conhecimento chave, aquele considerado estratégico pelos participantes do consórcio, não é disponibilizado, criando-se uma barreira para que o Brasil alcance o mesmo nível de desenvolvimento dessas instituições estrangeiras.

Existe muito a ser desenvolvido até que um modelo satisfatório de Sistema Inteligente de Manufatura seja alcançado. Espera-se, assim, que este trabalho sirva de base para que novas iniciativas sejam apoiadas.

## **7.2 Trabalhos futuros**

Esta tese se apresentou como um ponto de partida para uma nova abordagem de desenvolvimento de Sistemas Inteligentes de Manufatura. Embora seu foco tenha sido o estudo de seus fundamentos e o desenvolvimento de uma metodologia de projeto, muitos outros trabalhos foram iniciados em paralelo para aumentar o entendimento do sistema sendo estudado. Alguns desses trabalhos ainda estão em andamento ou não tiveram seus resultados aqui divulgados por uma questão de escopo e objetivos. Ainda assim, cabe neste ponto mencionar alguns desdobramentos desta tese, enquanto alicerce para novos trabalhos.

O desejo é de que os desenvolvimentos planejados para o futuro superem este trabalho, prevendo-se, para tanto, que esses sejam assumidos por um ou mais grupos de pesquisa trabalhando cooperativamente. Dentre os trabalhos almejados para o futuro, destaca-se:

Definir uma metodologia formal de avaliação de projeto: este trabalho utilizou a análise da matriz de projeto (DM) para avaliar o desempenho do sistema projetado. No entanto, já foi destacado que essa abordagem não explorou todo o formalismo (científico) do Projeto Axiomático [Suh, 1990], ficando, assim, quantitativa. Desse modo, trabalhos futuros são previstos na definição de uma metodologia formal para que o sistema projetado tenha sua performance avaliada de uma maneira melhor. Inclusive, um formalismo analítico pode ser aplicado à matriz de projeto, levando ao desenvolvimento de medidas quantitativas [Suh, 2001]. Ainda, ambientes de simulação podem ser associados diretamente a Decomposição de Projeto para

Sistemas Holônicos, provendo essa análise de uma maior confiabilidade [Melvin & Suh, 2002].

Integrar o sistema com novas interfaces: este trabalho concebeu, a partir das necessidades apontadas pela estrutura de projeto proposta, as interfaces de integração do sistema holônico com funções específicas de um sistema de manufatura. Para isso, protótipos vêm sendo criados e inúmeras possibilidades vêm sendo testadas. No entanto, não sendo objetivo desta tese a implementação dessas interfaces em si, os resultados parciais já obtidos ainda não foram relatados. Esses deverão, no entanto, servir de semente para que futuros trabalhos sejam realizados. Existe uma preocupação específica com a integração do sistema com sistemas operacionais, recursos humanos e sistemas legados, devendo esses ambientes ser os principais desenvolvimentos almejados.

Desenvolver as funcionalidades do sistema: o sistema proposto é baseado na inclusão de novas funcionalidades através de holons de suporte, tal qual mostrado na seção 6.2.2 deste trabalho. Alguns testes vêm sendo realizados, sobretudo, no que diz respeito à programação de atividades no sistema holônico. Atualmente, essa função vem sendo estudada através do desenvolvimento de classes específicas baseadas em algoritmos genéticos. Novamente não sendo parte do escopo desta tese, esses resultados não foram apresentados. Assim, planeja-se que trabalhos futuros sejam desenvolvidos nessa área.

Estudar questões de segurança: a utilização de agentes móveis fez com que houvesse uma especial preocupação com a questão segurança. O servidor de agentes móveis pode ser considerado uma porta de entrada que gera certa vulnerabilidade para o sistema. Ainda, os próprios agentes móveis podem ser utilizados como ferramentas prejudiciais ao sistema (e.g. como vírus de computador). Embora o ambiente adotado trate essa questão de maneira própria, estudos devem ser realizados para garantir que não haja pontos de vulnerabilidade, melhorando, assim, a confiabilidade do sistema sendo implementado.

Desenvolver ferramentas comerciais: a partir do sistema proposto, ferramentas comerciais podem ser desenvolvidas. Um exemplo seria uma versão do ONTOOL

específica para gestão de sistemas holônicos. Assim, com base nos desenvolvimentos apresentados e nos protótipos sendo implementados, trabalhos futuros são vislumbrados para acontecerem em conjunto com o *Computational Semiotics Group* da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (<http://www.dca.fee.unicamp.br/projects/semiotics/>). Um exemplo seria o desenvolvimento de uma rede de agentes enxuta, a qual poderia ser encapsulada dentro de um agente móvel. Com isso, o agente seria capaz de transportar todo um modelo holônico, aumentando ainda mais a flexibilidade e agilidade do sistema.

Aplicar em um estudo de caso industrial: para testar a robustez desses desenvolvimentos, aplicações futuras em sistemas reais também são planejadas. Para isso, espera-se contar com o apoio da iniciativa privada para que estes desenvolvimentos possam ser disseminados comercialmente.

### **7.3 Comentários finais**

Enquanto alguns países possuem uma visão clara de suas necessidades futuras, planejando estratégias que visem a excelência de seus setores de atuação, outros vêm fazendo o papel de meros espectadores. É clara a necessidade de investimentos que busquem diferenciais e um lugar de destaque na corrida pela vantagem competitiva. E, ao final deste trabalho, resta a questão: qual será a posição daqueles que ficarem à margem desse processo?

Gustavo Nucci Franco

Campinas, agosto de 2003.



## Referências Bibliográficas

- Albus, J.S. Outline for a Theory of Intelligence. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. v.21, n.3, 1991.
- Austin, J.E. *The Collaboration Challenge: How Nonprofits and Business Succeed Through Strategic Alliances*. 272pp. San Francisco (CA): Jossey-Bass, 2000.
- de Beauvoir, S. The Positive Aspects of Ambiguity. In: *The Ethics of Ambiguity*. p.74-155. New York (NY): Philosophical Library, 1948.
- Bell, R., Rahimifard, S., Toh, K. Holonic System. In: *Handbook of Life Cycle Engineering: Concepts, Models and Technologies*. Eds. A. Molina, J.M. Sánchez, A. Kusiak. Boston (MA): Kluwer Academic Publishers, 1999.
- von Bertalanffy, L. *General System Theory*. Revised Edition. New York (NY): George Bazillier, 1968.
- Binet, A., Simon, T. New Methods for the Diagnosis of the Intellectual Level of Subnormals. *Annals of Psychology*, 1905.
- Bongaerts, L. *Integration of Scheduling and Control in Holonic Manufacturing Systems*. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven (Bélgica), Dez., 1998. (Tese de Ph.D.)
- Bratman, M.E. *Intentions, Plans and Practical Reason*. Cambridge (MA): Harvard University Press, 1987.

- Bremer, C., Walz, M., Molina, A., Eversheim, W. Global Virtual Business: a Systematic Approach for Exploiting Business Opportunities in Dynamic Markets. *International Journal of Agile Manufacturing*. v.2, issue 1, 1999.
- Brooks, R.A. Elephants Don't Play Chess. In: *Designing Autonomous Systems*. Ed. P. Maes, p.3-15, Cambridge (MA): The MIT Press, 1990.
- Brooks, R.A. *Flesh and Machines: How Robots Will Change Us*. 260pp. New York (NY): Pantheon Books, 2002.
- Browne, J., Zhang, J. Extended and virtual enterprises: similarities and differences. *International Journal of Agile Management Systems*. v.1, n.1, p.30-36, 1999.
- Van Busschbach, E., Pieterse, B. & Zwegers, A. Support of Virtual Enterprises by an Integration Infrastructure. In: *Collaborative Business Ecosystems and Virtual Enterprises*. Ed. L.M. Camarinha-Matos. Boston (MA): Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Camarinha-Matos, L.M., Afsarmanesh, H. The VE Concept. In: *Infrastructures for VE Networking Industrial Enterprises*. Eds. L.M. Camarinha-Matos and H. Afsarmanesh, Boston (MA): Kluwer Academic Publishers, 1999.
- Cardelli, L. Mobile Computation. In: *Mobile Object Systems – Towards the Programmable Internet*. Eds. J. Vitek, C.F. Tschudin, Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 1996.
- Cardelli, L., Gordon, A.D. Mobile Ambients. In: *Foundations of Software Science and Computation Structures*. Ed. M. Nivat, Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 1998.
- Certo, S.C., Peter, J.P. *Strategic Management: a Focus on Process*. 355pp. New York (NY): McGraw-Hill, 1990.

- Chandler Jr., A.D. *Scale and Scope: the dynamics of Industrial Capitalism*. Cambridge (MA): Harvard University Press, 1990.
- Chandrasekaran, B. Natural and Social System Metaphors for Distributed Problem Solving: Introduction to the Issue. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. v.SMC-11, n.1, p.1-5, Jan., 1981.
- Ching, F. *Architecture, Form, Space, and Order*. New York (NY): Van Nostrand Reinhold, 1979.
- Christensen, J.H. HMS/FB Architecture and Implementation. In: *Agent Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach*. Ed. S.M. Deen. Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 2003.
- Le Corbusier. *Vers Une Architecture*. Paris (França): Editions Crès, 1923.
- Cuena, J., Ossowski, S. Distributed Models for Decision Support. In: *Multiagent Systems: a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. Edited by Gerhard Weiss, c.11, p.459-504. Cambridge (MA): The MIT Press, 1999.
- Debrun, M. A Idéia de Auto-Organização. In: *Auto-Organização*. Eds. M. Debrun, M.E.Q. Gonzales, O. Pessoa Jr. Campinas (SP): Coleção CLE, 1996.
- Decker, K.S. Distributed Problem-Solving Techniques: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. v.SMC-17, n.5, p.729-740, Sep./Oct., 1987. Decker, K.S., Sycara, K., Pannu, A., Williamson, M. Designing Behaviors for Information Agents. *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents - AGENTS 97*. Marina del Rey (CA), 5-8 Feb, 1997.
- Deming, W.E. *Out of the Crisis*. Cambridge (MA): MIT Press, 1986.

- Dennett, D.C. *The Intentional Stance*. Re-print edition, 400pp. Cambridge (MA): MIT Press, 1987.
- Dennett, D.C. *Kinds of Minds: toward an understanding of consciousness*. 192pp. New York (NY): Basic Books, 1996.
- Dennett, D.C., Kinsbourne, M. Time and the Observer: the Where and When of Consciousness in the Brain. *Behavioral and Brain Sciences*. n.15, v.2, p.183-247, 1995.
- Dilts, D.M., Boyd, N.P., Whorms, H.H. The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems*. v.10, n.1, p.79-93, 1991.
- Durfee, E.H. *Coordination of Distributed Problem Solvers*. Boston (MA): Kluwer Academic Press, 1988.
- Edvinsson, L, Malone, M.S. *Intellectual Capital: Realizing Your Company's True Value by Finding Its Hidden Brainpower*. 240pp. HarperBusiness, 1997.
- Lesser, V.R., Erman, L.D. A Retrospective View of the Hearsay-II Architecture. *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Cambridge (MA), August, 1977.
- Esmail, K.K., Saggu, J. A changing paradigm. *Manufacturing Engineer*. v.75, n.6, p.285-288, 1996.
- Evans, E.J. *The Forging of the Modern State: Early Industrial Britain 1783-1870*. Third edition. 648pp. London (UK): Longman, 2001.
- Farthing, G.W. *The Psychology of Consciousness*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1992.

Fayol, H. *Administration Industrielle et Générale*. 133pp., Dunod, 1916.

FIPA. *Fipa Abstract Architecture Specification*. Geneva (Suíça): Foundation for Intelligent Physical Agents, 12 Mar., 2002.

Fisher, M., Wooldridge, M. Specifying and Executing Protocols for Cooperative Actions. *Proceedings of the Second International Working Conference on Cooperating Knowledge-Based Systems*. Keele (UK), 14-17 Jun., 1994.

Fletcher, M., Garcia-Herreros, E., Christensen, J., Deen, S.M., Mittmann, R. An Open Architecture for Holonic Cooperation and Autonomy. *Proceedings of the 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications - DEXA 2000*. Greenwich, London, UK, 6-8 September, 2000.

Follett, M.P. *Dynamic Administration: the Collected Papers of Mary Parker Follett*. Edited by H.C. Metcalf, L. Urwick. New York (NY): Harper & Brothers, 1941.

Fraga, J.S., Rabelo, R.J., Siqueira, F.A., Montezi, C.B., Oliveira, R.S. Infrastructure for Virtual Enterprises in Large-Scale Open Systems. *Proceeding of the Eighth IEEE International 'Workshop on Object-oriented Real-time Dependable Systems – WORDS 2003*, Guadalajara (México), 2003.

Franco, G.N. *A Teoria das Restrições Integrada a Simulação em Computador para a Análise de Viabilidade de Mudanças em Sistemas Produtivos*. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas (SP), Jun., 1998. (dissertação de mestrado)

Franco, G.N., Batocchio, A. Sistemas Holônicos de Manufatura como Diferencial Competitivo. *Actas del IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica – CIDIM 99*. Santiago (Chile), 1999.

- Franco, G.N., Batocchio, A. The Holonic Paradigm as a New Metaphor for the Coordination Problem of Virtual Enterprises. In: *E-Business and Virtual Enterprises – Managing Business-to-Business Cooperation*. Eds. L.M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh, R.J. Rabelo, Boston (MA): Kluwer Academic Publishers, 1999.
- Franco, G.N., Batocchio, A. Towards an Axiomatic Framework to Support the Design of Holonic Systems. *Proceedings of the Second International Workshop on Industrial Applications of Holonic and Multi-agent Systems – HoloMas'01*. Munich (Alemanha), 3-7 Set., 2001.
- Friedrich, O. 1982: The Computer: by the Millions, it is Beeping its Way into Offices, schools and homes. *Time Magazine*. 3 Jan., 1983.
- Garlan, D., Perry, D. Software Architecture: Editorial. *IEEE Transactions on Software Engineering*. v. 21, n. 4, p. 269-274, 1995.
- Georgeff, M.P, Pell, B., Pollack, M., Tambe, M., Wooldridge, M. The Believe-Desire-Intention Model of Agency. In: *Intelligent Agents V. Agents Theories, Architectures, and Languages*. Eds. J.P. Muller, M. Singh, and A. Rao, Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 1999.
- Goranson, H.T. Infrastructure for the Advanced Virtual Enterprise: a Report Using a Brazilian-Based Example. In: *E-Business and Virtual Enterprises – Managing Business-to-Business Cooperation*. Eds. L.M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh, R.J. Rabelo, Boston (MA): Kluwer Academic Publishers, 1999.
- Gould, P. What is agility? *Manufacturing Engineer*. v.76, n.1, p.28-31, 1997.
- Gudwin, R.R. *Contribuições ao Estudo Matemático de Sistemas Inteligentes*. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Faculdade de Engenharia

Elétrica e de Computação, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial. Campinas (SP), Maio, 1996. (tese de Ph.D.)

Guerrero, J.A.S., Gomes, A.S.R., Gudwin, R.R. A Computational Tool to Model Intelligent Systems. *Anais do IV simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - IV SBAI*. São Paulo, SP, 8-10 Set., 1999.

Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M.H. *Neural Network Design*. 628pp. PWS, 1996.

Houaiss, A. *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa*. Rio de Janeiro (RJ): Editora Objetiva, 2001.

ISC1. Chairman Report. *First International IMS Steering Committee Meeting*. Toronto (Canadá), 27-28 Abr., 1995.

ISC3. Chairman Report. *Third International IMS Steering committee Meeting*. Toronto (Canadá), 16-17 Mai., 1996.

ISC16. Chairman Report. *Sixteenth International IMS Steering Committee Meeting*. Monterrey (CA), 14-16 Mai., 2003.

Juran, J.M. *Juran on Leadership for Quality: an executive handbook*. New York (NY): The Free Press, 1980.

Kidd, P.T. *Agile Manufacturing: Forging new Frontiers*. 388pp. Boston (MA): Addison-Wesley, 1994.

Kinny, D., Georgeff, M. Commitment and Effectiveness of Situated Agents. *Proceedings of the Twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence – IJCAI-91*. Sydney (Austrália), 1991.

Kotler, P. *Marketing management: analysis, planning, and control*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1967.

- Koestler, A. *The Ghost in the Machine*. London (UK): Arkana Books, 1967.
- Van Leeuwen, E.H., Norrie, D.H. Intelligent manufacturing: holons and holarchies. *Manufacturing Engineer*. v.76, n.2, pp.86-88, 1997.
- Leitão, P., Restrivo, F. An Agile and Cooperative Architecture for Distributed Manufacturing Systems. *Proceedings of the IASTED International Conference Robotics and Manufacturing – RM 2001*. Cancun (México), 21-24 May, 2001.
- Levitt, T. Marketing Intangible Products and Product Intangibles. *Harvard Business Review*. v.59, n.3, p.94-102, 1981.
- Levitt, T. The Globalization of Markets. *Harvard Business Review*. v.61, n.3, p.92-102, 1983.
- Lewis, R.W. *Modelling Distributed Control Systems Using IEC61499*. 208pp. IEE Publishing, 2001.
- Maleki, E.A. *Flexible Manufacturing Systems: the Technology and Management*. 277pp. New Jersey (NJ): Prentice Hall Inc., 1991.
- Mandelbrot, B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. 468pp., San Francisco (CA): W.H. Freeman & Co., 1982.
- Mathews, J. Organizational Foundations of Intelligent Manufacturing Systems: the Holonic Viewpoint. *Computer Integrated Manufacturing Systems*. v.8, n.4, p.237-243, 1995
- Maturana, F., Shen, W., Norrie, D.H. MetaMorph: An Adaptive Agent-Based Architecture for Intelligent Manufacturing. *International Journal of Production Research*. v.37, n.10, p.2159-2174, 1999.

- Melvin, J.W., Suh, N.P. Simulation Within the Axiomatic Design Framework. *The 2002 CIRP General Assembly*. San Sebastian (Espanha), 18-24 Aug., 2002.
- Minsky, M. *The Society of Mind*. 339pp. New York (NY): Simon & Schuster, 1985.
- Monden, Y. *Toyota Production System*. 247pp. Norcross (GA): Industrial Engineering and Management Press, 1983.
- Moulin, B., Chaib-draa, B. An Overview of Distributed Artificial Intelligence. In: *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. Eds. G. O'Hare, N.R. Jennings, c.1, New York (NY): John Wiley and Sons, 1996.
- Needham, J. *Order and Life*. New Haven (CT): Yale University Press, 1936.
- Nemes, L., Brown, B. GLOBEMAN21 – International Co-operation in Manufacturing Management. *Australian Academy of Technological Sciences and Engineering – Focus*. n.104, Nov./Dec., 1998.
- von Neumann, J. *Theory of Self-Reproducing Automata*. Urbana (IL): University of Illinois Press, 1966.
- Newell, A. The Knowledge Level. *Artificial Intelligence*. v.18, p.87-127, 1982.
- Newell, A. *Unified Theories of Cognition*. Cambridge (MA): Harvard University Press, 1990.
- Niefer, W. Segurança empresarial através de competência tecnológica. *Revista Siemens*. n.2, p.4-9, Dez, 1990.
- O'Brien, J.A. *Management Information Systems: Managing Information Technology in the E-Business Enterprise*. McGraw-Hill, 2003.

- Owen, D., Kruse, G. Follow the customer. *Manufacturing Engineer*. v.76, n.2, p.65-68, 1997.
- Okino, N. A Prototyping of Bionic Manufacturing System. *Proceeding of the International Conference on Object-Oriented Manufacturing Systems – ICOOMS'92*. Calgary (Canada), May, 1992.
- Ossowski, S., Hernández, J.Z., Iglesias, C.A., Fernández, A. Engineering Agent Systems for Decision Support. In: *Engineering Societies in the Agents World III*. Eds. P. Petta, R. Tolksdorf, F. Zambonelli. Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 2002.
- Parunak, H.V.D. *Practical and Industrial Applications of Agent-Based Systems*. 41pp., Industrial Technology Institute, 1998.
- Parunak, H.V.D., Baker, A.D., Clark, S.J. The AARIA Agent Architecture: From Manufacturing Requirements to Agent-Based System Design. *Proceedings of the Workshop on Agent-Based Manufacturing – ICAA'98*. Minneapolis (MN), USA, 10 May, 1998.
- Payne, T.R., Singh, R., Sycara, K. Calendar Agents on the Semantic Web. *IEEE Intelligent Systems*. v.17, n.3, p.84-86, 2002.
- Prahalad, C.K., Hamel, G. The Core Competence of the Corporation. *Harvard Business Review*. v.68, n.5/6, 1990.
- Rabelo, R.J., Camarinha-Matos, L.M. Towards Agile Scheduling in Extend Enterprise. In: *Balanced Automation Systems II – Implementing Challenges for Anthropocentric Manufacturing*. Eds. L.M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh, London (UK): Chapman & Hall, 1996.

- Rosenschein, J.S., Zlotkin, G. Designing Conventions for Automated Negotiation. *AI Magazine*. v.15, n.3, p.29-46, 1994.
- Rumbaugh, J.M., Booch, G., Jacobsen, I. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Addison-Wesley Object Technology Series. 576pp., Boston (MA): Addison-Wesley, 1998.
- Rumbaugh, J.M., Blaha, W., Premerlani, S., Eddy, W., Lorensen, W., Blaha, S. *Object-Oriented Modelling and Design*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall, 1991.
- Ryle, G. *The Concept of Mind*. Londres (UK): Hutchinson, 1949.
- Scheer, A-W. *CIM – Computer Integrated Manufacturing: Towards the Factory of the Future*. 3rd edition, 303pp. Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 1995.
- Schonberger, R.J. *World Class Manufacturing: the Next Decade*. 275pp. New York (NY): The Free Press, 1996.
- Schonberger, R.J. *Let's Fix It!: Overcoming the Crisis in Manufacturing*. 304pp. New York (NY): The Free Press, 2001.
- Shen, W., Norrie, D.H. Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey. *Knowledge and Information Systems, an International Journal*. v.1, n.2, p.129-156, 1999.
- Shen, W., Xue, D., and Norrie, D.H. An Agent-Based Manufacturing Enterprise Infrastructure for Distributed Integrated Intelligent Manufacturing Systems. *Proceedings of the Third International Conference and Exhibition on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents – PAAM 98*. March 23-25, London, UK, 1998.

- Simon, H.A. The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, v.106, n.6, 1962.
- Smith, R.G. The Contract Net Protocol: High Level Communication and Control in a Distributed Problem Solving. *IEEE Transactions on Computers*. v. C-29, n.12, p.1104-1113, Dec., 1980.
- Steels, L. Cooperation Between Distributed Agents Through Self Organization, In: *Decentralized A.I.* Eds. Y. Demazeau, J.P. Müller, Amsterdam (Holanda): Elsevier Science Publishers B.V., 1990.
- Suh, N.P. *The Principles of Design*. Oxford Series in Advanced Manufacturing, New York (NY): Oxford University Press, 1990.
- Suh, N.P. *Axiomatic Design: Advances and Applications*. Oxford Series in Advanced Manufacturing. 528pp., New York (NY): Oxford University Press, 2001.
- Sycara, K., Decker, K., Pannu, A., Williamson, M, Zeng, D. Distributed Intelligent Agents. *IEEE Expert: Intelligent Systems and their Applications*. v.11, n.6, p.36–45, 1996.
- Syverson, P., Cervesato, I. The Logic of Authentication Protocols. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 2001.
- Tapscott, D. *The Digital Economy: Promise & Peril in the Age of Networked Intelligence*. New York (NY): McGraw-Hill, 1996.
- Tarumarajah, A., Welles, A.J., Nemes, J. Comparison of Bionic, Fractal and Holonic Manufacturing System Concepts. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. v.9, n.3, p.217-226, 1996.

- Taylor, F.W. *The Principles of Scientific Management*. New York (NY): Harper & Row, 1911.
- Tinbergen, N. *Social Behaviour in Animals: with Special Reference to Vertebrates*. Second edition, 150pp., London (UK): Chapman and Hall, 1964.
- Toh, K.T.K., Newman, S.T., Bell, R. An Information Systems Architecture for Small Metalworking Companies. *Journal of Engineering Manufacture*. Part B, v.212, p.87-103, 1997.
- Toh, K.T.K. *A Reference Model for Information Specification for Metalworking SMEs*, Loughborough University. Loughborough (UK), 1997. (tese de Ph.D.)
- Tsvetovat, M., Sycara, K. Customer Coalitions in Electronic Markets. *ACM Conference on Electronic Commerce – ACM-EC 2000*. Minneapolis (MN), 17-20 Out., 2000.
- Turing, A.M. Computing Machinery and Intelligence. *Mind – the Journal of the Mind Association*. v.59, n.236, p. 433-460, 1950.
- Valckenaers, P., Brussel, H.V., Bonneville, F., Bongaerts, L., Wyns, J. IMS Test Case 5: Holonic Manufacturing Systems. *Preprints of IMS'94 – IFAC Workshop*. Vienna (Austria), 13-15 Jun., 1994.
- Vassallo, C. Fazer o bem compensa? *Revista Exame*. n.9, ed.660, 22 Abr., 1998.
- Vernadat, F.B. *Enterprise Modeling and Integration: Principles and Applications*. London (UK): Chapman & Hall, 1996.
- Vesterager, J., Tolle, M., Bernus, P. VERA: Virtual Enterprise Reference Architecture. *Global Engineering and Manufacturing in Enterprise Networks – GLOBEMEN*. Helsinki (Finlândia), 9-10 Dez., 2002.

- Vollman, T.E., Berry, W.L., Whybark, D.C. *Manufacturing Planning and Control Systems*. Third edition. New York (NY): Irwin, 1990.
- Warnecke, H.J. *Die Fraktale Fabrik: Revolution der Unternehmenskultur*. Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 1992.
- Weber, M. *The Theory of Social and Economic Organization*. 436pp. New York (NY): Oxford University Press, 1947.
- Weiss, G. Prologue. In: *Multiagent Systems: a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. Ed. Gerhard Weiss, p.1-23. Cambridge (MA): The MIT Press, 1999.
- Werner, E. The Design of Multi-agent Systems. In: *Decentralized A.I.* 3. Eds. E. Werner, Y. Demazeau, Amsterdam (Holanda): Elsevier Science Publishers B.V., 1991.
- Whitehead, A.N., and Russell, B. *Principia Mathematica*. 3 vols., second edition. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1925.
- Wiener, N. *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge (MA): MIT Press, 1965.
- Wight, O. *Manufacturing Resource Planning: MRP II*. Essex Junction (VT): Oliver Wight Limited Publication Inc., 1984.
- Winston, P.H. *Artificial Intelligence*. Third edition, 750pp. Boston (MA): Addison-Wesley, 1992.
- Wooldridge, M. *Introduction to Multiagent Systems*. 256pp. Chichester (UK): John Wiley & Sons, 2002.
- Wooldridge, M., Jennings, N.R. Intelligent agents: Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*. v.10, n.2, p.115-152, 1995.

- Womack, J.P.; Jones, D.T.; Ross, D. *The Machine that Changed the World*. New York (NY): Rawson Associates, 1990.
- Wong, D., Paciorek, N., Walsh, T., Di Celie, J., Young, M., Peet, B. Concordia: An Infrastructure for Collaborating Mobile Agents. *Proceedings of the First International Workshop on Mobile Agents*. Berlin, Germany, 7-8 Apr., 1997.
- Wright, P., Kroll, M.J., Parnell, J. *Strategic Management: Concepts*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall, 1998.
- Wyns, J. *Reference architecture for Holonic Manufacturing Systems - the Key to Support Evolution and Reconfiguration*. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven (Bélgica), Mar., 1999. (Tese de Ph.D.)
- Yokoo, M., Ishida, T. Search Algorithms for Agents. In: *Multiagent Systems: a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. Ed. Gerhard Weiss, c.4, p.165-199. Cambridge (MA): The MIT Press, 1999.
- Yoshikawa, H. Intelligent Manufacturing Systems: Technical Cooperation that Transcends Cultural Differences. *Proceedings of the JSPE/IFIP TC5/WG5.3 Workshop on the Design of Information Infrastructure Systems for Manufacturing – DIISM'93*. Tokyo, Japan, 8-10 November, 1993.

