

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Departamento de Informática



Agentes Inteligentes em Sistemas Holónicos de Produção

Paulo Alexandre Gandra de Sousa

Tese de Doutoramento

2000



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Departamento de Informática



Instituto Politécnico do Porto

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Informática

Agentes Inteligentes em Sistemas Holónicos de Produção

Tese submetida à Universidade do Minho para obtenção do grau de Doutor em Informática,
elaborada sob a orientação do Doutor José Carlos Ferreira Maia Neves (Professor Catedrático da
Universidade do Minho) e do Doutor Carlos Fernando Silva Ramos (Professor Coordenador do
Instituto Superior de Engenharia do Porto/Instituto Politécnico do Porto)

Paulo Alexandre Gandra de Sousa



Dezembro, 2000

1998 – 2000
Paulo Sousa
Departamento de Engenharia Informática
Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP/IPP)
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431
4200-072 PORTO
Portugal
Tel. +351 228 340 500
Fax +351 228 325 219

Correio electrónico: Paulo.Sousa@dei.isep.ipp.pt
Correio electrónico (alternativo): psousa@altavista.net
URL: <http://www.dei.isep.ipp.pt/~psousa>
(1.50 – U:02:14/01)

Para a Teresa,
Para os meus Pais

Prefácio

O Mestre nunca lhe daria um desejo sem que lhe desse também o poder de o realizar. Você talvez tenha de trabalhar muito para o concretizar.

Richard Bach, “Ilusões: As Aventuras de um Messias Relutante”.

Esta dissertação apresenta o resultado do meu trabalho de investigação na área dos Sistemas Holónicos de Produção, realizado entre Setembro de 1997 e Dezembro de 2000, nas instalações do Centro CIM do Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto (ISEP/IPP), sob a co-orientação do Professor Maia Neves da Universidade do Minho (UM) e do Professor Carlos Ramos do ISEP/IPP.

Desde cedo no meu percurso profissional (anterior à via académica) lidei com sistemas distribuídos, tendo inclusive desenvolvido um projecto interessantíssimo para a área de seguros que implicou a integração multiplataforma e o desenvolvimento de infra-estruturas de comunicação e distribuição. Quando mais tarde iniciei a minha colaboração com o ISEP/IPP como assistente, tentei, naturalmente, manter as afinidades com os sistemas distribuídos e nesse sentido, tomei conhecimento dos sistemas multiagente. Ao mesmo tempo, o Centro de CIM do ISEP/IPP ganhava um certo fôlego e um novo ânimo devido a novos projectos de investigação então aprovados.

Foi no âmbito de um desses projectos, mais concretamente, o projecto Europeu n.º 21955 do programa ESPRIT – *Intelligent Manufacturing Systems Working Group* (IMS-WG), que me vi envolvido a convite do Professor Carlos Ramos. Nas reuniões desse grupo de trabalho pude conviver com investigadores de outros países e entrar em contacto com os seus trabalhos. Dessas reuniões saí também com conhecimentos mais consolidados sobre os Sistemas Inteligentes para Produção e mais especificamente sobre os Sistemas Holónicos de Produção. Estes conceitos apresentavam características de sistemas distribuídos e de sistemas inteligentes, pelo que (embora não tocassem directamente a outra menina dos meus olhos, isto é, a Computação Gráfica) me pareceram interessantes como tema a abordar num futuro trabalho de pós-graduação.

Iniciei então o meu Doutoramento em 1997, tendo frequentado a parte lectiva do Mestrado em Informática da UM onde pude aprofundar alguns conhecimentos teóricos que mais tarde me foram úteis na elaboração do trabalho. O ISEP/IPP beneficiou de uma acção de formação avançada ao abrigo do programa PRODEP, podendo por conseguinte dispensar-me de serviço

docente. Desenvolvi então, durante três anos, o presente trabalho, aproveitando para participar em conferências onde trocava ideias e tomava conhecimento de outros trabalhos.

Três anos é um período de tempo relativamente longo e no qual muita coisa acontece. Dando razão à máxima filosófica “*nenhum homem é uma ilha*”, também a Vida é mais que o trabalho, e como tal, tive que encontrar o equilíbrio entre o dever profissional e o dever familiar, conjugando ainda o meu círculo de amigos. Penso que consegui encontrar esse equilíbrio, dando atenção àqueles que me são mais queridos sempre que precisaram de mim, sem por isso descuidar o trabalho. Este documento escrito dentro do prazo é para mim prova disso mesmo.

É com prazer que agora, volvidos cerca de três anos e meio, observo o trabalho feito, o suor escorrido, os desânimos e as alegrias. Especialmente, sinto a alegria daqueles que me são chegados pela minha própria alegria de acabar. É um alívio que sinto no final do trabalho, embora tenha a sensibilidade de que ainda há muito para fazer, e espere vir a poder fazer uma parte desse muito que ainda falta.

Porto, 18 de Dezembro de 2000

Paulo Sousa

Agradecimentos

Tenho muito que agradecer a várias pessoas pela ajuda e disponibilidade que mostraram ao longo destes três anos de realização dos trabalhos de Doutoramento. Começo, obviamente, por agradecer aos meus orientadores, o professor Maia Neves e o professor Carlos Ramos.

Um agradecimento especial é devido ao Professor Carlos Ramos, que como Director do Centro de CIM do ISEP/IPP proporcionou as condições necessárias para a elaboração deste trabalho, com apoio material na cedência de equipamento e apoio monetário para as diversas deslocações efectuadas. Também na sua qualidade de Coordenador do Grupo de Disciplinas de Engenharia da Programação, em 1997, depositou confiança em mim tendo apresentado a minha candidatura ao Conselho Científico do ISEP/IPP para as acções de formação do programa PRODEP.

Aproveito para agradecer ao PRODEP pelo apoio concedido à instituição de forma a suportar o pagamento das propinas de Doutoramento e a dispensa de serviço docente. Gostaria também de aproveitar a ocasião para agradecer ao Conselho Científico do ISEP/IPP pelos subsídios concedidos para deslocações a conferências onde fui apresentando o trabalho elaborado. Também no âmbito financeiro agradeço à Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento, ao Programa ESPRIT da União Europeia, à Junta Nacional de Investigação Científica e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia, pelo financiamento de projectos de investigação aos quais estive ligado e que suportaram parte das despesas de deslocações efectuadas.

Agradeço também aos colegas do Departamento de Engenharia Informática do ISEP/IPP e aos colegas do Centro CIM do ISEP/IPP, em especial àqueles que se encontravam na mesma altura em processo de Doutoramento, pela ajuda e intercâmbio de ideias e material para a elaboração do trabalho e deste documento. Um agradecimento especial ao João Rocha, ao Lino Ferreira e ao João Pinho pela cedência de algumas imagens, e ao Miguel Losa pelo apoio no acesso aos meios de impressão. Além dos colegas de trabalho, agradeço também ao Johan dos Santos e ao Jan Peeters, alunos ao abrigo do programa ERASMUS que contribuíram para este trabalho desenvolvendo alguns módulos do protótipo.

Aos meus amigos de longo data, sem nenhuma ordem em particular, o Alexandre, o Miranda, o Joaquim Miguel, o Rui, o Marcelo e o Paulo, que foram perguntando pelo trabalho e suportaram as minhas ausências, bem como as minhas presenças(!).

Não podia deixar de agradecer às pessoas mais importantes da minha vida. À minha família, pais, irmãs, irmão, cunhadas e cunhados, sobrinhas e sobrinhos, pelo apoio incondicional que sempre me deram. Sei que estão orgulhosos de mim por ter concluído mais esta fase e este trabalho é em parte para vós. Especialmente quero agradecer aos meus pais por terem suportado

os encargos dos meus estudos e pela confiança que me incutiram ao longo dos meus anos de vida, sei que é a vós que devo o facto de ser aquilo que sou hoje – *Muito Obrigado Pai e Mãe.*

Em especial tenho de agradecer à Teresa, companheira, esposa e amiga, que conforme prometido me apoiou nos bons e nos maus momentos, suportou as minhas faltas de atenção para ela e para a nossa casa e que me foi ajudando dentro do que lhe era possível. Foi também ela a minha conselheira gráfica. Por todo o amor e carinho; por toda a confiança em mim depositada; pela ajuda e motivação; pela companhia – *Obrigado Amor.*

Por último, gostaria de estender os meus agradecimentos a todos aqueles de uma forma ou de outra (fornecendo ideias e/ou criticando), foram ajudando anonimamente nas inúmeras discussões ao longo destes três anos.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.



Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA

Resumo

A sociedade tem sofrido constantes mutações desde a sua génese, facto acentuado na última metade do século XX, onde a criação de uma sociedade de informação (com uma preponderância de empregos no sector de serviços), alterou o *status quo* originando também grandes alterações à orgânica das empresas do sector produtivo.

De um ponto de vista tecnológico, verificou-se que o conceito de Produção Integrada por Computador enferma de várias limitações, nomeadamente no que toca a problemas de excessiva rigidez e centralização, pelo que novas abordagens para a solução do problema têm sido equacionadas com vista a colmatar tais falhas e criar produtos mais adequados ao contexto socioeconómico actual e futuro. Essencialmente, defende-se que os sistemas produtivos devem possuir atributos tais como, a distribuição, a descentralização, a autonomia e a agilidade. Adicionalmente, a capacidade de representar a incompletude do conhecimento real nos sistemas artificiais foi também identificada como um dos atributos essenciais a serem exibidos pelos sistemas produtivos. Nesse contexto, os Sistemas Holónicos de Produção e os Sistemas de Produção Baseados em Agentes apresentam-se como alternativas promissoras.

Assim, e para ultrapassar estes desafios, equacionou-se uma solução baseada nos *Sistemas Holónicos de Produção*, recorrendo aos *Sistemas Multiagente* e à *Programação em Lógica Estendida*, onde as principais entidades intervenientes no processo produtivo são modeladas como holons, cada uma contribuindo com uma pequena parcela da funcionalidade geral do sistema. Para suportar os conceitos desenvolvidos com o presente trabalho foi desenvolvido um sistema denominado *Fabricare*. Este sistema é composto por diversos holons que cooperam entre si utilizando uma variante estendida do *Protocolo de Rede de Contrato*. A finalidade da cooperação entre holons tem a ver com o escalonamento dinâmico de tarefas industriais. O sistema proposto é comparado do ponto de vista estrutural com trabalhos anteriores e, quando possível, são comparados os resultados obtidos, para uma melhor avaliação do seu desempenho.

Este trabalho apresenta como principais contribuições (i) a definição e especificação de uma arquitectura holónica para produção; (ii) a representação e identificação de cenários de informação incompleta na produção; (iii) uma extensão ao protocolo de rede de contrato; (iv) um algoritmo distribuído para escalonamento; e (v) o desenvolvimento de um sistema experimental.

Palavras Chave: Sistemas Multiagente; Sistemas Holónicos; Produção; Sistemas Inteligentes para Produção; Escalonamento Dinâmico; Programação em Lógica Estendida; Informação Incompleta.

Abstract

Society has experienced evolving mutations since the dawn of ages, especially on the last half of the twentieth century. The birth of an information society with a relevant number of jobs in the services sector has changed the *status quo*, and demanded enormous changes to the manufacturing enterprises' organisation.

From a technological point of view, it was observed that Computer Integrated Manufacturing (CIM) poses several drawbacks, namely excessive rigidity and centralization. New approaches have been proposed in order to solve these problems, providing systems that are more adequate to today's and future social-economic context. Essentially, these new approaches advocate a set of attributes such as distribution, decentralisation, autonomy and agility. Moreover, the ability to represent the incompleteness of real world's knowledge in artificial worlds has also been identified as an essential attribute. To this point, Holonic Manufacturing Systems and Multi-Agent System seem as a promising approach.

In order to overcome these challenges, a solution based on *Holonic Manufacturing Systems* has been proposed using *Multi-Agent Systems* and *Extended Logic Programming*. In this solution the main entities in the manufacturing process are modelled as holons, each one contributing with a small parcel of the overall system's functionality. To demonstrate the previous concepts a prototype system has been developed, named *Fabricare*. The *Fabricare* system is composed of several holons that cooperate among themselves using an extension to the *Contract Net Protocol*. The goal of this cooperation is the dynamic scheduling of manufacturing orders. The system is compared from a structural point of view with previous research works.

The main contributions of this work are (i) the definition of a holonic architecture for manufacturing enterprises; (ii) the representation and identification of scenarios with incomplete information in manufacturing; (iii) an extension to the contract net protocol; (iv) a distributed scheduling algorithm; and (v) a prototype system.

Keywords: Multi-Agent Systems; Holonic Systems; Manufacturing; Intelligent Manufacturing Systems; Dynamic Scheduling; Extended Logic Programming; Incomplete Information.

Índice

Prefácio	vii
Agradecimentos.....	ix
Resumo.....	xi
Abstract	xiii
Índice.....	xv
Índice de Figuras.....	xxi
Índice de Tabelas.....	xxv
Notação e Terminologia.....	xxvii

DISSERTAÇÃO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO _____ **1**

1.1 Enquadramento	2
1.2 Questões e Hipótese do Trabalho.....	3
1.3 Justificação da Investigação.....	5
1.4 Paradigmas Utilizados.....	6
1.5 Objectivos, Delimitação e Pressupostos	9
1.6 Metodologia	11
1.7 Contribuições e Originalidades.....	12
1.8 Estrutura e Resumo da Dissertação.....	14

CAPÍTULO 2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO _____ **19**

2.1 Introdução	20
2.2 Conceitos de Produção.....	21
2.3 Tipos de Produção.....	23
2.3.1 Função de Quantidade/Variedade.....	23
2.3.2 Relação com o Inventário	26
2.4 Funções da Actividade de Fabrico	27
2.4.1 Gestão da Produção	28
2.4.2 Projecto	28
2.4.3 Planeamento de Processos	29
2.4.4 Planeamento de Produção.....	31
2.4.5 Escalonamento e Balanceamento.....	32
2.4.6 Execução, Inspeção e Controlo de Qualidade.....	33

2.5	Produção Integrada por Computador.....	34
2.5.1	Introdução ao Conceito CIM.....	34
2.5.2	Suporte Tecnológico à Produção.....	35
2.5.2.1	Sistemas Flexíveis de Fabrico.....	37
2.5.2.2	Sistemas de Execução da Produção & Controlo.....	38
2.5.2.3	Apoio Computadorizado às Funções de Fabrico.....	39
2.5.3	Desafios à Implementação de CIM.....	41
2.6	Resumo do Capítulo.....	42

CAPÍTULO 3 A PRODUÇÃO E A ‘NOVA ECONOMIA’ _____ **45**

3.1	Introdução.....	46
3.2	Evolução dos Mercados e da Produção.....	48
3.2.1	Enquadramento Histórico.....	48
3.2.2	Tendências Observadas.....	50
3.3	O Contexto da ‘Nova Economia’.....	51
3.3.1	Força Laboral.....	53
3.3.2	Responsabilidade Social e Ambiental.....	54
3.3.3	O Conhecimento como Activo da Empresa.....	55
3.3.4	Dinâmica, Reactividade e Organização.....	56
3.3.4.1	Dinamismo, Globalização e Competição.....	56
3.3.4.2	Cadeia de Valor.....	57
3.3.4.3	Agilidade.....	59
3.3.5	Revolução nas Tecnologias de Informação.....	60
3.4	Produção: Presente e Futuro.....	61
3.4.1	Problemas com o ‘Presente’ da Produção.....	61
3.4.2	O ‘Futuro’ da Produção.....	63
3.4.3	Propriedades Desejáveis.....	65
3.5	Resumo do Capítulo.....	69

CAPÍTULO 4 SISTEMAS HOLÓNICOS DE PRODUÇÃO _____ **71**

4.1	Introdução.....	72
4.2	Sistemas Holónicos.....	73
4.2.1	As Origens.....	73
4.2.2	Características.....	76
4.3	A Produção e os Sistemas Holónicos.....	79
4.3.1	As Origens.....	79
4.3.2	Características de Sistemas Holónicos de Produção.....	79

4.3.3	Relacionamento com Requisitos Impostos pela ‘Nova Economia’	82
4.3.4	Metodologias Similares	83
4.3.4.1	Fábrica Fractal	83
4.3.4.2	Produção Biónica.....	84
4.3.4.3	O Que Há de Novo Nestas Abordagens	84
4.4	Mecanismos de Prototipagem	86
4.4.1	Sistemas Baseados em Agentes	86
4.4.1.1	Agentes	86
4.4.1.2	Sistemas Multiagente.....	89
4.4.1.3	Interacção.....	91
4.4.1.4	Redes de Contrato.....	93
4.4.1.5	Aplicabilidade.....	94
4.4.2	Programação em Lógica Estendida.....	95
4.4.2.1	Introdução	96
4.4.2.2	Extensões à Programação em Lógica	98
4.4.2.3	Aplicabilidade.....	101
4.5	Estado da Arte.....	102
4.5.1	Trabalhos de Referência	102
4.5.1.1	AARIA	102
4.5.1.2	HMS “ <i>Testbed</i> ”	103
4.5.1.3	PROSA	104
4.5.1.4	Gou & Luh.....	105
4.5.2	Outros Trabalhos.....	105
4.5.3	Sinopse.....	107
4.6	Resumo do Capítulo.....	109

CAPÍTULO 5 MODELO PROPOSTO: ESPECIFICAÇÃO _____ 111

5.1	Introdução	112
5.2	Arquitectura Proposta	115
5.2.1	Arquitectura Holónica do Sistema	115
5.2.2	Arquétipos de Holons e Holarquias	120
5.2.2.1	Holons.....	120
5.2.2.2	Holarquias.....	122
5.3	Especificação dos Holons	124
5.3.1	Serviço de Directório	124
5.3.2	Holon de Produto	125
5.3.3	Holon de Tarefa	127

5.3.4	Holon de Recurso	129
5.3.5	Holon de Compra	131
5.3.6	Holon de Fornecedor	133
5.3.7	Holon de Venda.....	134
5.3.8	Holon de Cliente.....	136
5.4	Tratamento de Informação Incompleta.....	137
5.4.1	Representação Utilizada	138
5.4.1.1	Informação Negativa Explícita	138
5.4.1.2	Nulos do Tipo Desconhecido	138
5.4.1.3	Nulos do Tipo Desconhecido de um Conjunto de Valores	139
5.4.1.4	Nulos do Tipo Não Permitido	139
5.4.1.5	Meta-Interpretador	140
5.4.2	Casos Identificados	141
5.4.2.1	Arquétipo dos Holon	141
5.4.2.2	Holon de Serviços de Directório	142
5.4.2.3	Holons de Produto.....	143
5.4.2.4	Holons de Tarefa	144
5.4.2.5	Holons de Recurso	145
5.4.2.6	Holons de Compra	146
5.4.2.7	Holons de Fornecedor	147
5.4.2.8	Holon de Gestão de Compras.....	148
5.4.2.9	Holons de Venda.....	149
5.4.2.10	Holons de Cliente.....	151
5.4.2.11	Holon de Gestão de Vendas	151
5.5	Resumo do Capítulo	152

CAPÍTULO 6 MODELO PROPOSTO: OPERAÇÃO 155

6.1	Introdução.....	156
6.2	Processo de Negociação	158
6.2.1	Descrição.....	159
6.2.1.1	Anúncio de Tarefa.....	159
6.2.1.2	Requisição de Serviços	161
6.2.1.3	Influência Directa.....	162
6.2.1.4	Influência Inversa e Proposta	163
6.2.1.5	Contratação	164
6.2.2	Tratamento de Conflitos.....	166
6.2.3	Tratamento de Excepções.....	168

6.2.4	Análise da Complexidade do Protocolo.....	169
6.3	Funcionamento dos Holons.....	178
6.3.1	Arquétipo de Holon	179
6.3.2	Serviço de Directório	181
6.3.3	Holon de Produto	183
6.3.4	Holon de Escalonamento	185
6.3.5	Holon de Tarefa	187
6.3.6	Holon de Recurso.....	195
6.3.7	Relação com o Método Original de Escalonamento.....	205
6.4	Sistema Desenvolvido.....	207
6.4.1	Introdução	208
6.4.2	Núcleo de Holons.....	209
6.4.3	Ferramentas de Exploração.....	213
6.4.4	Programas Adicionais.....	214
6.4.5	Comentários ao Desenvolvimento do Protótipo <i>Fabricare</i>	217
6.5	Comparação com Trabalhos Relacionados	218
6.5.1	Âmbito e Estrutura (Entidades Modeladas).....	220
6.5.2	Socialização	221
6.5.3	Tratamento de Informação Incompleta.....	222
6.5.4	Procedimento de Escalonamento	223
6.6	Resumo do Capítulo.....	224
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES		225
7.1	Síntese da Dissertação.....	226
7.2	Contribuições, Conclusões e Originalidades.....	231
7.3	Tese	239
7.4	Limitações e Trabalho Futuro	241
BIBLIOGRAFIA		247
APÊNDICES		
APÊNDICE A EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS		271
A.1	Experiências do Método Original	271
A.1.1	Exemplo 1	272
A.1.2	Exemplo 2.....	273
A.1.3	Exemplo 3.....	274

A.1.4 Exemplo 4	275
A.2 Experiências <i>Fabricare</i>	277
A.2.1 Exemplo 1	278
A.2.2 Exemplo 2	279
A.2.3 Exemplo 3	280
A.2.4 Exemplo 4	281
A.2.5 Exemplo 5	282
 APÊNDICE B MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DA COMPLEXIDADE DE PRCPR	285
B.1 Simplificações	285
B.2 Folha de Cálculo	286
 APÊNDICE C SÍTIOS WWW	291
C.1 Pessoas	291
C.2 Instituições e Grupos I&D	293
C.3 Projectos	295
C.4 Miscelânea	296
 ÍNDICE REMISSIVO	299

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1 – Sistema de produção</i>	20
<i>Figura 2.2 – Job shop: (a) agrupamento por função; (b) ilhas multi-funcionais</i>	25
<i>Figura 2.3 – Relação entre os vários tipos de produção</i>	26
<i>Figura 2.4 – Funcionalidades de uma empresa de produção industrial</i>	27
<i>Figura 2.5 – Exemplo de produto: (a) desenho técnico; (b) imagem tridimensional</i>	29
<i>Figura 2.6 – Exemplo de produto: identificação das operações</i>	30
<i>Figura 2.7 – Exemplo de produto: (a) grafo de precedências; (b) plano gerado</i>	30
<i>Figura 2.8 – Ciclo do planeamento da produção</i>	31
<i>Figura 2.9 – Exemplo de produto: escalonamento das operações</i>	33
<i>Figura 2.10 – Componentes CIM</i>	37
<i>Figura 2.11 – Exemplo de um sistema FMS</i>	38
<i>Figura 2.12 – Exemplo de arquitectura de controlo de um FMS</i>	39
<i>Figura 3.1 – Agilidade, adaptabilidade e flexibilidade</i>	67
<i>Figura 3.2 – Sistemas adaptáveis vs. não adaptáveis</i>	68
<i>Figura 4.1 – Exemplos de sistemas holónicos: (a) militar; (b) biológico</i>	76
<i>Figura 4.2 – Exemplo de um sistema holónico</i>	78
<i>Figura 4.3 – Relação entre comportamentos</i>	92
<i>Figura 4.4 – Protocolo de rede de contrato</i>	94
<i>Figura 4.5 – Algoritmo do meta-interpretador para lógica estendida</i>	100
<i>Figura 4.6 – Arquitectura do sistema AARIA</i>	103
<i>Figura 4.7 – Arquitectura de referência PROSA</i>	104
<i>Figura 4.8 – Arquitectura holónica de Gou & Luh</i>	105
<i>Figura 5.1 – Principais áreas funcionais do sistema</i>	112
<i>Figura 5.2 – Caso de utilização para a função ‘Produção’</i>	113
<i>Figura 5.3 – Um possível cenário de exploração</i>	114
<i>Figura 5.4 – Entidades intervenientes no sistema e seus relacionamentos</i>	115
<i>Figura 5.5 – Arquitectura holónica do sistema de fabrico</i>	116
<i>Figura 5.6 – Arquitectura holónica do sistema comercial</i>	116
<i>Figura 5.7 – Arquétipo de um agente</i>	120
<i>Figura 5.8 – Holarquias</i>	123
<i>Figura 5.9 – Diagrama de classes para holons de produto</i>	126
<i>Figura 5.10 – Exemplo de representação de um plano</i>	127
<i>Figura 5.11 – Diagrama de classes para holons de tarefa</i>	128
<i>Figura 5.12 – Diagrama de classes para holons de recurso</i>	130

<i>Figura 5.13 – Diagrama de classes para holons de compras</i>	132
<i>Figura 5.14 – Diagrama de classes para holons de fornecedor</i>	134
<i>Figura 5.15 – Diagrama de classes para holons de vendas</i>	135
<i>Figura 5.16 – Diagrama de classes para holons de cliente</i>	137
<i>Figura 6.1 – Escalonamento</i>	156
<i>Figura 6.2 – Escalonamento com operações antecessoras de maior duração</i>	157
<i>Figura 6.3 – Escalonamento com recursos alternativos</i>	157
<i>Figura 6.4 – Escalonamento com operações paralelas</i>	158
<i>Figura 6.5 – Anúncio de tarefa</i>	159
<i>Figura 6.6 – Requisição de recursos</i>	161
<i>Figura 6.7 – Influência directa</i>	162
<i>Figura 6.8 – Influência inversa e ofertas</i>	163
<i>Figura 6.9 – Conclusão da negociação</i>	165
<i>Figura 6.10 – Alteração ao PRCPR: tratamento de conflitos</i>	166
<i>Figura 6.11 – Alterações ao PRCPR: (a) fim de negociação; (b) abandono de recursos</i>	167
<i>Figura 6.12 – Exemplo de avaria de um recurso</i>	169
<i>Figura 6.13 – Exemplos de planos para estudo da complexidade do protocolo RCPR</i>	172
<i>Figura 6.14 – Alterações na fase de influência directa, influência inversa e proposta</i>	174
<i>Figura 6.15 – Evolução do número de mensagens com o aumento de operações</i>	176
<i>Figura 6.16 – Tamanho total de mensagens</i>	178
<i>Figura 6.17 – Algoritmo de processamento de mensagens de gestão de holarquias</i>	179
<i>Figura 6.18 – Algoritmo de funcionamento do holon de serviços de directório</i>	181
<i>Figura 6.19 – Algoritmo de funcionamento de um holon de produto</i>	184
<i>Figura 6.20 – Algoritmo de funcionamento do holon de escalonamento</i>	186
<i>Figura 6.21 – Algoritmo de funcionamento do holon de escalonamento: libertar tarefas</i>	187
<i>Figura 6.22 – Diagrama de estado para holons de tarefa</i>	188
<i>Figura 6.23 – Algoritmo de funcionamento de um holon de tarefa</i>	188
<i>Figura 6.24 – Algoritmo de funcionamento de um holon de tarefa: inicialização</i>	189
<i>Figura 6.25 – Algoritmo de funcionamento de holon de tarefa: negociação</i>	191
<i>Figura 6.26 – Algoritmo de funcionamento de holon de tarefa: avaliação de propostas</i>	192
<i>Figura 6.27 – Algoritmo de funcionamento de um holon de tarefa: recombinar</i>	194
<i>Figura 6.28 – Diagrama de estado para holons de tarefa: acompanhamento</i>	195
<i>Figura 6.29 – Agenda de um recurso e agenda livre</i>	196
<i>Figura 6.30 – Limitação de agendas: (a) inferior; (b) superior</i>	196
<i>Figura 6.31 – Influência de agendas: (a) directa; (b) inversa</i>	197
<i>Figura 6.32 – Diagrama de estado para holons de recurso: planeamento</i>	197
<i>Figura 6.33 – Algoritmo de planeamento de holons de recurso</i>	198

<i>Figura 6.34 – Protocolo RCPR nos holons de recurso</i>	199
<i>Figura 6.35 – Diagrama de estado para holons de recurso: execução</i>	204
<i>Figura 6.36 – Comportamentos de escalonamento</i>	206
<i>Figura 6.37 – Vista geral do protótipo Fabricare</i>	208
<i>Figura 6.38 – Metodologia Fabricare</i>	209
<i>Figura 6.39 – Interface do protótipo Fabricare: holons de suporte</i>	210
<i>Figura 6.40 – Interface do protótipo Fabricare: holons de tarefa</i>	211
<i>Figura 6.41 – Interface do protótipo Fabricare: holons de recurso</i>	212
<i>Figura 6.42 – Interface do protótipo Fabricare: aplicação “Deploy”</i>	213
<i>Figura 6.43 – Interface do protótipo Fabricare: aplicação “Lançador de Tarefas”</i>	214
<i>Figura 6.44 – Interface do protótipo Fabricare: aplicação “Configuration Designer”</i>	214
<i>Figura 6.45 – Interface do protótipo Fabricare: aplicação “Control Panel”</i>	215
<i>Figura 6.46 – Interface do protótipo Fabricare: escalonamento de um Holon de Recurso</i>	216
<i>Figura 6.47 – Interface do protótipo Fabricare: escalonamento de um Holon deTarefa</i>	216
<i>Figura 6.48 – Interface do protótipo Fabricare: aplicação “Product Builder”</i>	217
<i>Figura 7.1 – Arquitectura holónica proposta (actividades de fabrico)</i>	231
<i>Figura 7.2 – Protocolo RCPR</i>	234
<i>Figura 7.3 – Vista geral do protótipo Fabricare</i>	237
<i>Figura 7.4 – Exemplos de meta-regras para selecção de recursos</i>	242
<i>Figura 7.5 – Reescalonamento para operação prioritária: (a) pedido; (b) re-arranjo</i>	244
<i>Figura A.1 – Plano utilizado nas experiências</i>	271
<i>Figura A.2 – Resultado da experiência original nº 1</i>	272
<i>Figura A.3 – Resultado da experiência original nº 2</i>	273
<i>Figura A.4 – Resultado da experiência original nº 3</i>	275
<i>Figura A.5 – Planos utilizado na experiência nº 4</i>	275
<i>Figura A.6 – Resultado da experiência original nº 4</i>	277
<i>Figura A.7 – Resultado da experiência Fabricare nº 1</i>	279
<i>Figura A.8 – Resultado da experiência Fabricare nº 2</i>	280
<i>Figura A.9 – Resultado da experiência Fabricare nº 3</i>	281
<i>Figura A.10 – Resultado da experiência Fabricare nº 4</i>	282
<i>Figura A.11 – Resultado da experiência Fabricare nº 5</i>	283
<i>Figura B.1 – Plano exemplo utilizado para análise de complexidade</i>	285
<i>Figura B.2 – Folha de cálculo utilizada para análise de complexidade do PRCPR</i>	288

Índice de Tabelas

<i>Tabela 3.1 – Comparação entre a ‘Velha’ e a ‘Nova Economia’</i>	46
<i>Tabela 3.2 – A indústria na ‘Velha’ e na ‘Nova Economia’</i>	47
<i>Tabela 3.3 – A força laboral na ‘Velha’ e na ‘Nova Economia’</i>	53
<i>Tabela 4.1 – Relacionamento entre propriedades desejadas e sistemas holónicos</i>	82
<i>Tabela 4.2 – Sinopse dos trabalhos relacionados</i>	107
<i>Tabela 5.1 – Legenda da arquitectura</i>	117
<i>Tabela 5.2 – Holons por holarquia</i>	117
<i>Tabela 5.3 – Características dos holons da arquitectura proposta</i>	118
<i>Tabela 5.4 – Constantes utilizadas na arquitectura proposta</i>	121
<i>Tabela 5.5 – Informação incompleta no arquétipo dos holons</i>	141
<i>Tabela 5.6 – Informação incompleta no holon de serviços de directório</i>	142
<i>Tabela 5.7 – Informação incompleta nos holons de produto</i>	143
<i>Tabela 5.8 – Informação incompleta nos holons de tarefa</i>	144
<i>Tabela 5.9 – Informação incompleta nos holons de recurso</i>	145
<i>Tabela 5.10 – Informação incompleta nos holons de compra</i>	146
<i>Tabela 5.11 – Informação incompleta nos holons de fornecedor</i>	147
<i>Tabela 5.12 – Informação incompleta no holon de gestão de compras</i>	148
<i>Tabela 5.13 – Informação incompleta nos holons de venda</i>	149
<i>Tabela 5.14 – Informação incompleta nos holons de cliente</i>	151
<i>Tabela 5.15 – Informação incompleta no holon de gestão de vendas</i>	152
<i>Tabela 6.1 – Valores de $\chi(\mathcal{P})$ e M_{prepr} para os planos exemplo</i>	172
<i>Tabela 6.2 – Valores de M_{prepr}^2 para planos exemplo</i>	175
<i>Tabela 6.3 – Transições na máquina de estados do PRCPR nos holons de recurso</i>	200
<i>Tabela 6.4 – Comparação entre o sistema Fabricare e trabalhos relacionados</i>	219
<i>Tabela A.1 – Condições de teste da experiência original nº 1</i>	272
<i>Tabela A.2 – Resultados da experiência original nº 1</i>	272
<i>Tabela A.3 – Condições de teste da experiência original nº 2</i>	273
<i>Tabela A.4 – Resultados da experiência original nº 2</i>	273
<i>Tabela A.5 – Condições de teste da experiência original nº 3</i>	274
<i>Tabela A.6 – Resultados da experiência original nº 3</i>	274
<i>Tabela A.7 – Condições de teste da experiência original nº 4</i>	275
<i>Tabela A.8 – Resultados da experiência original nº 4</i>	276
<i>Tabela A.9 – Condições de teste das experiências Fabricare</i>	278
<i>Tabela A.10 – Resultados da experiência Fabricare nº 1</i>	278

<i>Tabela A.11 – Resultados da experiência Fabricare n° 2.....</i>	<i>279</i>
<i>Tabela A.12 – Resultados da experiência Fabricare n° 3.....</i>	<i>280</i>
<i>Tabela A.13 – Resultados da experiência Fabricare n° 4.....</i>	<i>281</i>
<i>Tabela A.14 – Resultados da experiência Fabricare n° 5.....</i>	<i>282</i>
<i>Tabela B.1 – Fórmulas da folha de cálculo.....</i>	<i>286</i>
<i>Tabela C.1 – Legenda utilizada nos web sites.....</i>	<i>291</i>

Notação e Terminologia

Notação Geral

A notação utilizada ao longo do documento segue a convenção apresentada a seguir:

- *Texto em itálico* – para palavras em língua estrangeira (*i.e.*, Inglês ou Latim), exemplo: “[...] utilizando abordagens *ad hoc*”. Também utilizado para dar ênfase a um determinado termo; exemplo: “Uma fórmula *válida* é aquela [...]”;
- *Texto em negrito* – utilizado para realçar um conceito/palavra no meio de um parágrafo; exemplo: “Um **Recurso** tem várias [...]”;
- *Texto de cor clara* – para indicar uma referência bibliográfica; exemplos: “[Sousa e Ramos, 1997]”; “Bradshaw (1997) apresenta [...]”; Também utilizado para endereços *web*; exemplo: “<http://www.dei.isep.ipp.pt/>”
- *Parágrafo indentado em itálico* – citações bibliográficas;
- *Parágrafo com espaçamento simples em itálico* – para os extractos de código ou extensões de predicados lógicos; exemplo: “*cliente(301, ‘Silva’, ‘João’)*”;
- *Letras em caligrafia e letras do alfabeto Grego* – utilizadas para referenciar elementos (*e.g.*, conjuntos, tuplos) nas descrições formais; exemplo “seja \mathcal{A} o conjunto[...]”; exemplo: “O tuplo $\langle \beta, \delta \rangle$ representa [...]”.

Ao longo do texto são utilizadas várias letras do alfabeto grego em algumas fórmulas e descrições formais, pelo que em seguida se apresenta uma relação desses símbolos por forma a facilitar a sua leitura [Larouse, 1995].

Maiúscula	Minúscula	Nome	Equivalência
A	α	Alfa	a
B	β	Beta	b
Γ	γ	Gama	g
Δ	δ	Delta	d
E	ε	Épsilon	e
Z	ζ	Zeta	dz
H	η	Eta	e (longo)
Θ	θ	Téta	th

Maiúscula	Minúscula	Nome	Equivalência
I	ι	Iota	i
K	κ	Kapa	k
Λ	λ	Lambda	l
M	μ	Mi	m
N	ν	Ni	n
Ξ	ξ	Csi	ks ou x
O	ο	Omicron	o (breve)
Π	π	Pi	p
P	ρ	Ró	r
Σ	σ	Sigma	s
T	τ	Tau	t
Υ	υ	Ípsilon	u
Φ	φ ou ϕ	Fi	f
X	χ	Qui	kh
Ψ	ψ	Psi	ps
Ω	ω	Omega	o (longo)

Os diagramas apresentados ao longo da dissertação para descrever conceitos e funcionalidades seguem a notação UML (*Unified Modelling Language*) [Rumbaugh *et al.*, 1997], que é uma notação normalizada para o desenho de diagramas orientados a objectos. A notação UML surgiu da combinação da notação Booch [Booch, 1991] com a notação OMT (*Object Modelling Technique*) [Rumbaugh *et al.*, 1991] e a notação de Jacobson [Jacobson, 1992] (em particular no que se refere aos Casos de Utilização).

Terminologia

Ao longo do texto utilizou-se a terminologia Portuguesa; no entanto, e embora já exista algum consenso na passagem de alguns termos técnicos para Português, o seu uso ainda não é generalizado. Ao longo do texto optou-se, por conseguinte, por traduzir os termos e conceitos, mas manter os acrónimos em Inglês, pois são estes os mais conhecidos. Por exemplo, ‘Projecto Assistido por Computador’ é certamente reconhecido como ‘*Computer Aided Design*’, no entanto, o acrónimo PAC nem sempre é reconhecido como sinónimo de CAD.

Para facilitar a leitura, apresenta-se em seguida a tradução para a língua Portuguesa de alguns termos e expressões Anglo-Saxónicas.

Termo Anglo-Saxónico	Tradução para Português
<i>Art-to-Part</i>	Arte-até-Peça
<i>Bottleneck</i>	“Gargalo” de eficiência
<i>Holarchic</i>	Holárquico
<i>Holarchy</i>	Holarquia
<i>Knowledge worker</i>	Trabalhador Perito
<i>Mass Customisation</i>	Personalização em Massa
<i>Responsiveness</i>	Reactividade
<i>Stock</i>	Existência
<i>Template</i>	Modelo
<i>Time-to-market</i>	Tempo de colocação no mercado

Certos termos e expressões não foram traduzidos devido à dificuldade de instalação do termo ou expressão na língua de Camões. Essas excepções são apresentadas de seguida:

- *Batch* – (informática) aplicação de execução não interactiva;
- *Blackboard* – (informática) “quadro negro”, área de memória partilhada para escrita e leitura entre vários processos;
- *Buffer* – (produção) espaço de armazenamento à entrada de um recurso onde podem ser colocados material e componentes a utilizar numa operação;
- *Business-to-business* – comércio electrónico entre empresas (*e.g.*, fornecedores de componentes, subcontratados)
- *Business-to-consumer* – comércio electrónico entre empresas e consumidores finais;
- *Downsizing* – diminuição do número de efectivos de uma empresa;
- *Empowerment* – (gestão) aumento da autonomia e responsabilidade de decisão por parte dos trabalhadores;
- *Flow shop* – a melhor tradução seria “oficina de fluxo”;
- *Hardware* – não foi traduzido devido à utilização corrente do termo em Inglês;
- *Holon* – a melhor tradução seria “holão”;
- *Job shop* – a melhor tradução seria “oficina de processo”;

- *Just-in-time* – a melhor tradução seria “mesmo-a-tempo”;
- *Marketing* – não foi traduzido devido à utilização corrente do termo em Inglês;
- *Master/slave* – “mestre/escravo”, forma de organização em que um processo controla (comanda) o funcionamento de outro;
- *Offline* – “fora de linha”, normalmente utilizado para situações em que um determinado procedimento é efectuado sem ligação em tempo real ao sistema físico que representa;
- *Online* – “em linha”, normalmente utilizado para situações em que um determinado procedimento é efectuado com ligação em tempo real ao sistema físico que representa;
- *Outsourcing* – (gestão) contratação de determinadas capacidades a empresas terceiras;
- *Script* – (informática) um programa interpretado que permite a extensão de funcionalidades de uma aplicação ou então que define o controlo de funcionamento de uma aplicação;
- *Setup* – (produção) actividade de preparação de um recurso para a execução de determinada operação (e.g., carregar as ferramentas necessárias);
- *Shell* – (informática) a consola de comandos do sistema operativo;
- *Sockets* – (informática) um mecanismo de comunicação entre processos;
- *Software* – não foi traduzido devido à utilização corrente do termo em Inglês;
- *Web site* – não foi traduzido devido à utilização corrente do termo em Inglês.

Predicados Primitivos e Auxiliares

<i>atribui(V, Expr)</i>	Calcula o valor de <i>Expr</i> e coloca o resultado em <i>V</i>
<i>comprimento(L, N)</i>	Determina o número de elementos (<i>N</i>) da lista <i>L</i>
<i>enviar_msg(Destino, Msg)</i>	Envia uma mensagem de conteúdo <i>Msg</i> ao holon <i>Destino</i>
<i>inserir(P)</i>	Aumenta a base de conhecimento do holon, acrescentando-lhe o termo <i>P</i>
<i>juntar(L1, L2, LR)</i>	Concatenação das listas <i>L1</i> e <i>L2</i> formando a lista <i>LR</i>
<i>membro(X, L)</i>	Determina se <i>X</i> é um dos elementos da lista <i>L</i>
<i>nivelar(Lista-de-Listas, Lista)</i>	Obtenção de uma lista de elementos a partir de uma lista de listas
<i>receber_msg(Emissor, Msg)</i>	Recebe uma mensagem com conteúdo <i>Msg</i> do holon <i>Emissor</i>

$retira_elemento(X, L, LR)$	Constrói a lista LR a partir da lista L retirando-lhe o elemento X
$str_term_cat(A1, A2, AR)$	Concatenação dos átomos $A1$ e $A2$ formando o átomo AR
$todas_as_soluções(T, G, R)$	Obtenção da lista R com membros do tipo T , contendo todas as soluções da questão G à base de conhecimento

Símbolos

\mathcal{L}	Linguagem lógica
KB	Base de conhecimento de um holon
$KB\epsilon$	Base de conhecimento mutuamente exclusivo
$KB\pi$	Base de conhecimento sobre situações proibidas
\mathcal{D}	Conjunto de identificadores de nulos desconhecidos
Q	Uma questão sobre um predicado $q(a_0, \dots, a_n)$
a_i	Um argumento de uma questão ou de um predicado
P	Um axioma da base de conhecimento na forma $p(a_0, \dots, a_n)$
ω	Valor nulo do tipo desconhecido
δ	Valor nulo do tipo não permitido
\mathcal{P}	Plano de produção de um produto
$\chi(\mathcal{P})$	Número de combinações existentes para um plano \mathcal{P} tendo em conta os recursos alternativos para cada operação do plano
M_{prcpr}	Número de mensagens trocadas numa execução do Protocolo de Rede de Contrato com Propagação de Restrições (PRCPR)
$\psi(\mathcal{P})$	Número de mensagens trocadas durante a fase influência directa ou inversa na execução do PRCPR
\emptyset	Conjunto vazio
M_{prcpr}^2	Número de mensagens trocadas numa execução da variante do protocolo RCPR
T_{inf}	Tamanho de uma mensagem de influência no PRCPR
T_{bid}	Tamanho de uma mensagem de proposta no PRCPR
$T_{inf}^2(i)$	Tamanho de uma mensagem de influência na variante do PRCPR
$T_{bid}^2(i)$	Tamanho de uma mensagem de proposta na variante do PRCPR

$T_{prcpr inf+bid }$	Tamanho total das mensagens de influência e proposta no PRCPR
$T_{prcpr inf+bid }^2$	Tamanho total das mensagens de influência e proposta na variante do PRCPR
$\frac{T_{prcpr inf+bid }^2}{T_{prcpr inf+bid }}$	Ganho relativo da variante do PRCPR em relação ao PRCPR original
γ	Identificação de um holon
\mathcal{M}	Uma mensagem recebida
Act	A identificação da operação a executar na lista de membros
η	Identificação de um holon
H	a identificação de uma holarquia
\mathcal{H}	Lista de habilidades de um holon
\hat{h}	Identificação de uma habilidade
\mathcal{V}	Valor de verdade (<i>verdadeiro, falso, desconhecido</i>) da prova de uma questão
$Crit$	Critério de optimização de um plano de produção
LR	O conjunto de recursos libertados
HE	Identificação do Holon de Escalonamento
\mathcal{R}	Conjunto de recursos necessários para a execução de um plano \mathcal{P}
Λ	Conjunto de recursos contactados para cada operação do plano \mathcal{P}
Θ	Conjunto de propostas recebidas
op	Uma operação
\mathcal{T}	Lista de contratos de operações de um holon de tarefa
Φ	Conjunto de propostas avaliadas
κ	Um critério de avaliação de propostas
Π	O conjunto de planos já utilizados
\mathcal{A}	Agenda de actividades de um holon

Acrónimos

AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i> (Veículo Autónomo)
BC	Base de Conhecimento
BMS	<i>Bionic Manufacturing System</i> (Sistema de Produção Biónico)

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projecto Assistido por Computador)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia Assistida por Computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Produção Assistida por Computador)
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning</i> (Planeamento de Processos Assistido por Computador)
CAQC	<i>Computer Aided Quality Control</i> (Controlo da Qualidade Assistido por Computador)
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i> (Produção Integrada por Computador)
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Controlo Numérico Computadorizado)
CRP	<i>Capacity Requirements Planning</i> (Planeamento de Necessidades de Capacidade)
CSCW	<i>Computer Supported Co-operative Work</i> (Trabalho Cooperativo Apoiado por Computador)
EDI	<i>Electronic Data Interchange</i> (Troca de Dados Electrónicos)
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> (Planeamento de Recursos Empresariais)
EUA	Estados Unidos da América
EV	Empresa Virtual
FF	<i>Fractal Factory</i> (Fábrica Fractal)
FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i> (Sistema Flexível de Fabrico)
HMS	<i>Holonic Manufacturing System</i> (Sistema Holónico de Produção)
IA	Inteligência Artificial
IAD	Inteligência Artificial Distribuída
IMS	<i>Intelligent Manufacturing System</i> (Sistema Inteligente de Produção)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para a Padronização)
KQML	<i>Knowledge Query and Manipulation Language</i> (Linguagem de Interrogação e Manipulação de Conhecimento)
MES	<i>Manufacturing Execution System</i> (Sistema de Execução da Produção)
MRP1	<i>Material Requirements Planning</i> (Planeamento de Necessidades de Materiais)
MRP2	<i>Manufacturing Resources Planning</i> (Planeamento de Recursos de Produção)
n.a.	Não aplicável
NC	<i>Numerical Control</i> (Controlo Numérico)

PC	<i>Personal Computer</i> (Computador Pessoal)
PL	Programação em Lógica
PLE	Programação em Lógica Estendida
PMF	Pressuposto do Mundo Fechado
PMP	Plano Mestre de Produção
PNM	Plano de Necessidades de Material
PPC	<i>Production Planning and Control</i> (Planeamento e Controlo da Produção)
PRC	Protocolo de Rede de Contrato
RCPR	Rede de Contrato com Propagação de Restrições
RDP	Resolução Distribuída de Problemas
SMA	Sistema Multiagente
SP	SICStus PROLOG
SPBA	Sistema de Produção Baseado em Agentes
TI	Tecnologia(s) de Informação
UE	União Europeia
UML	<i>Unified Modelling Language</i> (Linguagem de Modelação Universal)
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
VB	Visual Basic
WWW	<i>World Wide Web</i>

DISSERTAÇÃO
