

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---



*Os mercados mudam, os gostos mudam, como tal, também as empresas e indivíduos que escolhem competir nesses mercados têm de mudar.*

An Wang (1920 – 1990), ex-presidente da Wang Laboratories Inc., inventor do Dispositivo de Controlo de Transferência de Impulsos.

**A** sociedade está em constante mudança, tendo sido especialmente no século XX que se verificaram algumas das mais radicais transformações [Drucker, 1994]. Essa mudança tem tido implicações a vários níveis, forçando os cidadãos e empresas a adaptarem-se de forma a prosperarem. Ao longo da evolução da sociedade, e consequentemente da economia, de base Agrícola para base Industrial e mais tarde para base Informacional, os Sistemas Produtivos têm acompanhado as mudanças observadas em seu redor [RCBI, 1998]. Será no entanto possível continuar a acompanhar o ritmo vertiginoso destas transformações?

Como resultado da maior concorrência (devido ao excesso de capacidade de fabrico e à globalização) os produtores viram-se forçados a aumentar a diversidade de produtos e reduzir os custos, o que teve como consequência o aumento da complexidade dos processo de fabrico e tornou as empresas mais susceptíveis de serem afectadas por distúrbios vindos do exterior

[Albayrak e Bussmann, 1996b] [Bussmann, 1998]. Com todas as convulsões sociais ocorridas nos últimos tempos e tendo em conta os mais diversos avanços tecnológicos, novos desafios são colocados às empresas em geral e ao sector produtivo em particular.

Na senda de resolver tais desafios, apresenta-se com este trabalho o sistema experimental *Fabricare* baseado nos paradigmas dos sistemas holónicos, dos sistemas multiagente e da programação em lógica estendida.

Antes, porém, de descrever o sistema, convém enquadrar o trabalho aqui realizado, pelo que neste capítulo será apresentada uma introdução ao tema da dissertação, começando-se por um enquadramento do trabalho e pela questão central em termos de investigação, à qual se segue uma hipótese proposta de resolução. Após se elaborar um pouco sobre a investigação a realizar, serão apresentados e justificados os diversos paradigmas para a resolução de problemas a utilizar no trabalho, bem como os objectivos a atingir e a metodologia de execução utilizada. Em seguida apresentam-se as contribuições e originalidades do trabalho. Finalmente, será referida a estrutura da dissertação.

## 1.1 Enquadramento

Nos últimos anos têm sido observadas várias tendências na sociedade e nos sistemas de produção [Solberg e Kashyap, 1993] [Kusiak, 1990] [NGM, 1997], entre as quais: a globalização de mercados; o aumento da personalização de produtos; o aumento da complexidade tecnológica; o aumento da concorrência; a diminuição dos ciclos de vida de produtos; e o aumento dos requisitos de qualidade. Adicionalmente, é necessário prestar especial atenção a questões ambientais e ao custo e consumo de energia.

Das mudanças observadas surge uma Nova Economia caracterizada por adjectivos como *Digital, Global, Competitiva, e Focada no Indivíduo* [Schonfeld, 1998] [Kelly, 1998].

Os avanços nas Tecnologias de Informação (TI) e a popularidade da Internet tornaram possível a existência de uma *Economia Digital* com troca electrónica de documentação de negócio em grande escala (*e.g.*, facturas, notas de encomenda, descrições de processos) [Schonfeld, 1998] [Korper *et al.*, 1999]. Além disso, também tornaram possível a prestação de serviços de “forma digital”, não convencional (*e.g.*, bancos ou corretoras na Internet).

A abertura de novos mercados na Europa de Leste, bem com a criação de um mercado único na União Europeia (UE); a diminuição de entraves fiscais e medidas proteccionistas às importações/exportações; e (mais uma vez) a ubiquidade da Internet criaram uma verdadeira *Economia Global* [Kelly, 1998] [Schwartz, 1997]. Serviços podem ser prestados de forma digital em qualquer parte do globo com acesso à Internet e os produtos podem ser entregues graças às

grandes multinacionais de distribuição e a acordos/parcerias entre produtores e distribuidores. As redes mundiais de telecomunicações fomentam o comércio global, aproximando-nos cada vez mais da Aldeia Global [Tapscott e Caston, 1993], ao mesmo tempo que o maior acesso à informação favorece os consumidores, permitindo-lhes estar melhor informados, tendo conseqüentemente mais escolhas e como tal mais poder [Langer, 1999].

A globalização tornou possível o acesso a novos mercados, mas também tornou possível o acesso de “jogadores” exteriores aos mercados domésticos de cada empresa [Tapscott e Caston, 1993]. Por outro lado, as redes de distribuição e (novamente) a Internet encurtaram distâncias, pelo que uma empresa a milhares de quilómetros é agora concorrente de qualquer empresa que competia apenas a nível regional. Esta nova configuração criou uma *Economia Extremamente Competitiva*, mais do que alguma vez foi visto. Além disso, o estado saudável das economias ocidentais favorecem a criação de novas empresas [Atkinson e Court, 1998], aumentando ainda mais o número de competidores.

A *Sociedade de Consumo Personalizado* é uma consequência da tentativa de atingir os gostos individuais de cada cidadão, recorrendo à *Personalização em Massa*; i.e., ao “*desenvolvimento, produção, marketing e distribuição de produtos e serviços personalizados de forma maciça*” [Pine *et al.*, 1999]. Ou seja, por outras palavras, pretende-se produzir inúmeros produtos e inúmeras variações desses produtos, de acordo com requisitos específicos dos clientes, em qualquer quantidade, a preços e a velocidades próprios dos da produção em massa [Davis, 1987] [Rabon e Scheller, 1997] [Martin, 1997] [Cox e Alm, 1998]. Neste cenário a tecnologia desempenha um papel fundamental [Schonfeld, 1998].

Uma empresa de produção necessita então de lidar com o aumento de concorrência, consequência da globalização de mercados, e com o aumento da diversidade de produtos, consequência do crescente foco no indivíduo em vez dos mercados massificados. Para qualquer empresa é fundamental encontrar o seu lugar no triângulo custo-inovação-qualidade, pois estes três vectores condicionam a competitividade da empresa. Nesse sentido, é importante considerar as alterações na sociedade e nas tecnologias como uma força motriz e não como uma condicionante, tentando daí gerar mais valias (*e.g.*, a Internet permite novas oportunidades de negócio – possibilidade de alcançar novos mercados – bem como as tecnologias de trabalho em grupo permitem a geração de ideias e o aumento da produtividade).

## 1.2 Questões e Hipótese do Trabalho

Conforme foi apresentado na secção anterior, as enormes mudanças verificadas na sociedade impõem novos desafios às empresas de Produção. Esta ‘Nova Economia’ implica uma mudança

continua, crescente dependência no conhecimento e inovação, e maiores parcerias (local e globalmente [NGM, 1997]), obrigando as empresas a mudar os seus procedimentos internos e filosofias de trabalho.

Para continuarem activas essas empresas necessitam adaptar-se e realçar as suas mais valias. Não só é necessário aumentar a *competitividade*, como também é necessário manter a *vitalidade*; *i.e.*, a capacidade de se adaptar a novos requisitos impostos pelos consumidores. Novas abordagens surgem, prometendo ajudar a empresa a ultrapassar os desafios que se lhe colocam, tendo como objectivo *a sobrevivência da empresa*.

Uma das principais questões colocadas por estas mudanças e pelo actual contexto socioeconómico é:

---

**Questão** – *Como será possível manter a vitalidade (e competitividade) de uma empresa de Produção na 'Sociedade de Consumo Personalizado' do século XXI?*

---

Obviamente, o âmbito desta questão ultrapassa em muito a área das Ciências da Computação (onde esta tese se insere) estando directamente relacionada com aspectos de gestão e organização de empresas. No entanto, de um ponto de vista mais tecnológico (especialmente, das tecnologias de informação), a questão pode ser limitada e reformulada para:

---

**Questão** – *Como será possível construir sistemas informáticos de apoio à produção capazes de responder às necessidades da empresa na 'Sociedade de Consumo Personalizado' do século XXI?*

---

Para tentar responder a estas questões sugere-se a seguinte hipótese cuja validade se irá equacionar ao longo do trabalho:

---

**Hipótese** – *A divisão dos Sistemas de Produção (mais concretamente dos sistemas informáticos de apoio à produção) em 'pequenas' unidades autónomas organizadas de acordo com a Teoria dos Sistemas Holónicos permite garantir a agilidade e vitalidade necessárias às empresas na nova sociedade.*

---

Essencialmente, defende-se que o novo contexto socioeconómico impõe novos requisitos e novos desafios aos sistemas de produção, e que os Sistemas Holónicos de Produção não só exibem tais características como permitem responder aos desafios impostos.

### 1.3 Justificação da Investigação

Embora nos foquemos e façamos algum abuso das tecnologias de informação e, mais concretamente, das tecnologias de Internet para suportar a chamada ‘economia de informação’, o planeta ainda necessita de agricultura e indústria para a criação de riqueza e para o fornecimento de necessidades humanas básicas [Tapscott e Caston, 1993].

Até agora, o conceito de Produção Integrada por Computador (CIM) tem sido promovido universalmente, no entanto, foram detectados alguns problemas no processo de implementação (*e.g.*, custo elevado) sendo opinião corrente que o CIM não é a resposta para os sistemas de produção do futuro, tendo sido, entre outros, identificados os seguintes problemas [Höpf, 1994] [Ueda, 1994] [Bongaerts *et al.*, 1995] [Parunak, 1996] [Tharumarajah *et al.*, 1996] [Gou e Luh, 1997] [Bussmann, 1998] [Kádár *et al.*, 1998] [Shen e Norrie, 1999]:

- *Inflexibilidade* – a arquitectura CIM é fixa, independentemente dos requisitos de produção, sendo difícil expandir ou reconfigurar um processo para a produção de novos produtos;
- *Falta de robustez* – a eficiência não é garantida fora da gama operatória pré-definida; além disso, a existência de um controlador central cria a existência de um único ponto de falha;
- *Falta de adaptabilidade* – no que se refere a avarias ou ao mau funcionamento dos recursos;
- *Dificuldade de manutenção* – devido à falta frequente de dados por parte das máquinas.

Um dos principais problemas das implementações CIM é a sua estrutura hierárquica com controlo centralizado que não se adequa à produção de lotes quase unitários em mercados altamente dinâmicos e em constante mudança [Kádár *et al.*, 1998].

Adicionalmente, a Produção mudou radicalmente no decurso dos últimos anos e novas alterações vão continuar a acontecer no futuro [Parker, 1997] [CVM, 1999] [Hunt, 1989] [Kidd, 2000], sendo factor crítico para o sucesso, a necessidade de ‘excelência’ na produção como resultado da criação de mercados globais [IMS, URL] [Barram, 1994]. Além disso, a Produção é actualmente (e continuará a ser) um dos principais geradores de riqueza, sendo de extrema

importância para manter esses mesmos níveis de riqueza [ISC, 1994] [IMS, URL] [CVM, 1999] [Wyns, 1999] e estabelecer uma base sólida para o crescimento económico no futuro [IMS, URL].

Todas estas razões criam a necessidade de construir sistemas de produção inovadores, capazes de tratar das mudanças, recuperar das perturbações e integrar-se no novo contexto socioeconómico de forma efectiva e eficiente.

## 1.4 Paradigmas Utilizados

Nesta secção são brevemente apresentados os paradigmas utilizados para a resolução de problemas, os quais serão posteriormente detalhados no Capítulo 4.

No que concerne à Produção, os problemas são extremamente complexos, com inúmeras variáveis, de dimensão considerável e, talvez o mais importante de tudo, extremamente dinâmicos; *i.e.*, as condições não são estáticas. Sendo que esta constante dinâmica influencia a resolução do problema, exigindo que se esteja frequentemente à procura de uma nova solução. Solução essa, que além de adequada deve ser encontrada em tempo útil.

Nas últimas décadas têm-se desenvolvido técnicas e sistemas para lidar com a crescente complexidade dos problemas, quer em termos da sua formulação, quer no que se refere à sua resolução. Tais sistemas, porém, não se apresentam sem algumas limitações, em que as de natureza computacional serão *primus inter pares*. Torna-se portanto necessário encontrar soluções técnicas/tecnológicas para o desenvolvimento de sistemas mais adequados a problemas com estas características. É neste contexto que se recorre à Computação Distribuída e à Inteligência Artificial.

Um sistema computacionalmente distribuído é composto por vários processos (possivelmente em localizações geográficas distintas), em que as tarefas estão divididas de forma funcional e/ou de acordo com o poder de computação de cada máquina. Os *Sistemas Distribuídos* oferecem várias vantagens na manutenção, pela facilidade de intercâmbio entre as diversas entidades do sistema. Os *Sistemas Inteligentes* (fruto da aplicação de técnicas de Inteligência Artificial) materializam-se através de entidades com valências tais como, cooperação, coordenação, racionalidade, e inteligência, oferecendo um grande grau de flexibilidade e de auto-adaptação. É pois de concluir que da fusão destas duas disciplinas (*i.e.*, Inteligência Artificial e Computação Distribuída) surja uma nova, capaz de oferecer, pelo menos teoricamente, melhores soluções para problemas complexos em domínios caracterizados por uma grande dinâmica de alteração e/ou adaptação.

A integração das técnicas da Inteligência Artificial com as da Computação Distribuída, deu corpo a uma nova disciplina, a *Inteligência Artificial Distribuída* (IAD). A IAD foi inicialmente

definida como uma disciplina de resolução de problemas em que os dados, o conhecimento, e a computação estão geograficamente separadas em termos lógicos e/ou físicos [Nilsson, 1981] [Davis, 1980]. A investigação em IAD deu mais tarde origem aos *Sistemas Baseados em Agentes* e aos *Sistemas Multiagente* (SMA). Embora seja um campo de estudo desde o início dos anos noventa, não existe uma definição consensual de agente. Normalmente, é aceite que um agente é uma entidade autónoma, com um certo grau de inteligência, que persegue os seus objectivos, muitas vezes em representação de um utilizador. Tais agentes têm que ser dotados de capacidade de socialização de modo a lidar com outros agentes. Exibem comportamentos pró-activos, guiados por objectivos e reactivos; e podem apresentar dotes para a aprendizagem automática.

Os Sistemas Baseados em Agentes são “*adequados para aplicações modulares, descentralizadas, dinâmicas, subespecificadas* [estrutura não completamente definida] *e complexas*” [Parunak, 1998a], que apresentem um “*grande número de interacções entre componentes*” [Kouiss *et al.*, 1997]. Ora, um Sistema de Produção é caracterizado [Sousa *et al.*, 2000b]:

- pelas suas funções (*e.g.*, Planeamento de Produção; Escalonamento; Gestão de Existências) e pelas suas entidades (*e.g.*, recursos, ordens de fabrico) que podem ser considerados *módulos*;
- como será apresentado na secção 3.4.1, a estrutura hierárquica e centralizada, tradicionalmente utilizada nos sistemas de Produção Integrada por Computador (CIM), não é satisfatória para os requisitos actuais, pelo que os novos sistemas de produção devem ser *descentralizados*;
- pelo *dinamismo* oriundo do funcionamento do sistema (*i.e.*, novas encomendas, novos produtos, mudanças de recursos, avarias);
- pela constante mudança do processo produtivo, onde consumidores e fornecedores podem variar, nunca se sabendo a estrutura exacta da cadeia de fornecimento, o que implica *subespecificação*;
- pelo elevado número de produtos, recursos e ordens de fabrico, bem como os diferentes planos alternativos de produção, que são factores contribuintes para a *complexidade* dos Sistemas Produtivos.

Por estes motivos, espera-se que os princípios nos quais se baseiam a Inteligência Artificial Distribuída e os Sistemas Multiagente sejam úteis na criação da nova geração de sistemas de produção [Sousa e Ramos, 1997]. Esta metodologia irá permitir modelar um sistema como um conjunto de elementos autónomos, inteligentes e cooperativos, de forma a obter arquitecturas flexíveis e reconfiguráveis [Sousa e Ramos, 1998].

Ora um sistema complexo, flexível e configurável é precisamente o alvo de atenção da teoria dos Sistemas Holónicos [Koestler, 1967]. Os *Sistemas Holónicos* baseiam-se na noção de ‘*holon*’ [Koestler, 1967] que significa “o todo” e “a parte”, permitindo esta dualidade que um holon seja ao mesmo tempo visto como um elemento de construção de unidades maiores e ele próprio uma dessas unidades. Koestler (1967) define duas propriedades fundamentais dos holons: *autonomia* (a capacidade de uma entidade criar e controlar a execução dos seus próprios planos e estratégias) e *cooperação* (um processo no qual um conjunto de entidades desenvolve e executa planos mutuamente aceites). A estrutura organizacional de um sistema holónico é denominada holarquia. Pela própria definição de holon, uma holarquia é um holon. O ponto forte dos sistemas holónicos reside no facto de permitir a construção de sistemas complexos que, não obstante a sua complexidade, são eficientes na utilização de recursos, altamente resilientes às perturbações (externas e internas) e adaptáveis às mudanças no ambiente no qual existem [Valckenaers *et al.*, 1997] [Langer, 1999].

Na área de Produção, os *Sistemas Holónicos de Produção* (HMS) [Valckenaers *et al.*, 1994a] [Valckenaers *et al.*, 1997] [van Brussel *et al.*, 1998] materializam o paradigma que melhor representa os conceitos da IAD e SMA [Sousa *et al.*, 2000b]. Em contrapartida aos Agentes Inteligentes existem Holons, que são entidades igualmente autónomas (de *hardware* e/ou de *software*), possivelmente inteligentes que cooperam com outros holons na realização de tarefas. Semelhante ao conceito de *Sistema de Produção Baseado em Agentes* (SPBA), surge o conceito de Sistema Holónico de Produção como um agrupamento de holons que possibilita a existência de um processo de fabrico dinâmico e descentralizado, onde as mudanças são efectuadas de forma dinâmica e contínua [Valckenaers *et al.*, 1994a]. Não obstante a sobreposição dos conceitos, eles complementam-se, nomeadamente, na concretização de Sistemas Holónicos através dos Sistemas Multiagente [Bongaerts, 1998] [Busmann, 1998] [Kirsch *et al.*, 1998] [Sousa *et al.*, 2000c] [Ulieru *et al.*, 2000].

Estes conceitos são inerentemente distribuídos e por isso torna-se necessário regulamentar as interacções entre as diversas entidades existentes no sistema. Ora, se existem alternativas para a prossecução de uma dada tarefa, e se esta for para ser conduzida por entes racionais, os agentes, então há que os agrupar (*i.e.*, socializar [Neves e Machado, 1997a]), dotá-los de capacidade de argumentação e formas de negociação (tímidas aproximações a este problema estão desde já documentadas, sendo de referir o trabalho desenvolvido sobre *Redes de Contrato* [Smith, 1980] [Davis e Smith, 1983]). Por outras palavras, um protocolo que regule o relacionamento entre contratante e contratado, é factor decisivo em todo este processo.

Para a representação de conhecimento nos computadores, recorre-se muitas vezes à utilização de uma *Linguagem Lógica* [Wooldridge, 1992] [Russell e Norvig, 1995]. As linguagens lógicas permitem uma descrição formal e não ambígua de factos, que podem ser verificados e validados



formalmente [Ligeza, 1997] [Pereira, 1997] [Santos *et al.*, 1999]. O paradigma da *Programação em Lógica* (PL) baseia-se na utilização da lógica como uma linguagem de programação. A PL é feita segundo uma abordagem declarativa, onde se descreve um problema em termos de axiomas lógicos. No entanto, cenários de Informação Incompleta ocorrem normalmente nas Bases de Conhecimento e nos processos de negociação [Neves, 1984] [Traylor e Gelfond, 1993] [Neves *et al.*, 1997b]. A PL é baseada nalguns pressupostos (*e.g.*, Mundo Fechado, que significa que todo o conhecimento de determinados factos é conhecido) que impõem limitações ao tipo de processamento necessário para tratar informação incompleta. Os sistemas reais podem no entanto, beneficiar largamente de abordagens que evitem estas limitações. Ao adicionar capacidade para representação e raciocínio sobre informação incompleta a um sistema, a sua base de conhecimento passa a poder descrever o mundo real de forma muito mais correcta. A *Programação em Lógica Estendida* (PLE) é uma extensão da PL, permitindo a inclusão de informação negativa explícita, sendo que, por defeito, todo o conhecimento é aberto, ou seja, é possível deduzir se determinado facto é verdadeiro, falso ou desconhecido.

Resumidamente, ao longo deste trabalho aplicar-se-ão então os paradigmas de Sistemas Multiagente, Sistemas de Produção Baseados em Agentes, Sistemas Holónicos, Sistemas Holónicos de Produção e Programação em Lógica Estendida.

## 1.5 Objectivos, Delimitação e Pressupostos

De uma maneira geral, com este trabalho procurar-se-ão desenvolver comunidades de agentes holónicos que ajudem na resolução de problemas em ambientes industriais (com especial ênfase no escalonamento dinâmico de ordens de fabrico – caso de teste seleccionado), com recurso à especialização e descentralização de tarefas.

Mais concretamente, os objectivos do presente trabalho serão enumerados a seguir:

1. *Estudo da área de aplicação (produção)* – obtenção de conhecimento na área de produção, nomeadamente no que toca a dificuldades e problemas existentes (Capítulo 2 e Capítulo 3);
2. *Estudo do conceito enunciado na hipótese* – obtenção de conhecimento acerca de Sistemas Holónicos de Produção e técnicas de implementação de tais sistemas (Capítulo 4);
3. *Especificação de uma arquitectura* – que permita antever soluções para os problemas encontrados (secção 5.2 );
4. *Especificação de cada entidade constituinte da arquitectura* – em termos de conhecimento (secção 5.2 ) e programação (secção 6.2 ).

- conhecimento (secção 5.3 ) e operação (secção 6.3 );
5. *Tratamento de informação incompleta* – representação (secção 5.4.1), identificação de casos (secção 5.4.2) e utilização de informação incompleta na base de conhecimento de cada entidade;
  6. *Especificação de um mecanismo de negociação* – para regulamentar a interacção entre os vários elementos constituintes da arquitectura (secção 6.2 );
  7. *Desenvolvimento de um protótipo* – dando corpo à arquitectura conceptualizada anteriormente (secção 6.4 );
  8. *Resposta às questões enunciadas* – aplicando as conclusões obtidas na elaboração do trabalho (secção 7.3 );
  9. *Elaboração da tese escrita* – como veículo de transmissão do conhecimento científico alcançado durante a elaboração do trabalho.

Derivadas da questão inicialmente colocada em termos de investigação e de hipóteses porventura referenciadas, bem como dos objectivos apresentados, surgem algumas questões de carácter genérico ou particular que devem ser respondidas durante ou após a realização do trabalho:

- Que suporte tecnológico se deve usar para a realização de sistemas de acordo com a Teoria dos Sistemas Holónicos?
- Será possível utilizar a estrutura holónica noutras áreas que não a da Produção?
- Que holons e holarquias há que definir de forma a abordar as várias actividades da produção de forma integrada?
- Existirão cenários de falta de informação e conhecimento nas actividades de produção? Se sim, quais?
- De que forma deverão os vários elementos da arquitectura comunicar e interagir entre si?
- Como saberão os vários elementos da existência de outros elementos?
- Como assegurar a coerência das decisões tomadas por cada elemento?
- Como formular, descrever e decompor o problema?

Os vários capítulos irão apresentando respostas a estas perguntas que serão respondidas de forma explícita na secção 7.3 e abordadas nas conclusões.

Este trabalho (e mais concretamente, o protótipo) é delimitado à actividade de escalonamento de ordens de fabrico, assumindo-se para tal algumas simplificações, nomeadamente:

- *buffers* de capacidade infinita;
- operações de *setup* com tempo de concretização ou duração zero;
- transporte entre máquinas com duração zero e sempre disponível.

Na implementação do sistema são ignorados aspectos de segurança (tais como verificação da identidade) admitindo-se sempre que a informação enviada por um holon a outro é válida e de confiança – *pressuposto de veracidade*.

O termo ‘Fabrico’ é utilizado ao longo do texto para denotar as actividades de execução (fabricação) de produtos, ou seja, as actividades envolvidas no processo de obter um produto com existência física. Por outro lado, o termo ‘Produção’ é utilizado num sentido mais abrangente, englobando o fabrico e todas as restantes actividades económicas, financeiras e comerciais da empresa.

Ao longo do texto refere-se algumas vezes o termo ‘Nova Economia’, que não deve ser interpretado como referindo-se às indústrias de telecomunicações, entretenimento e conteúdos, mas devendo isso sim, ser interpretado como o contexto socioeconómico das últimas décadas do século XX, obviamente muito condicionado pelas alterações provocadas pelas indústrias referidas.

## 1.6 Metodologia

O método experimental que se utilizou para a realização deste trabalho teve em linha de conta os passos seguintes:

1. *Revisão de literatura existente sobre o domínio de aplicação; i.e., sobre Sistemas Produtivos* – serviu esta fase para identificar as tendências verificadas na sociedade em geral e as suas implicações para a Produção, bem como as visões de futuro propostas por alguns grupos de trabalho;
2. *Revisão de literatura existente sobre os paradigmas a utilizar (com especial realce para aplicações em Produção)* – nesta fase adquiriram-se conhecimentos sobre a utilização das técnicas e paradigmas, e analisaram-se trabalhos anteriores para identificar aspectos em aberto ainda não tratados;

3. *Concepção do sistema informático* – após uma análise profunda dos conhecimentos adquiridos nas fases anteriores, partiu-se para a concepção de um sistema informático capaz de apoiar as hipóteses em aberto na resolução do problema;
4. *Implementação do protótipo e teste* – esta fase pretendeu passar à prática as ideias conceptualizadas na fase anterior. Foi escolhida uma subárea de aplicação (escalonamento dinâmico de ordens de produção) e desenvolvido um protótipo com o qual se realizaram testes com vista a obter resultados que pudessem suportar todo o trabalho desenvolvido até então;
5. *Elaboração da Tese* – finalmente, passou-se à fase de escrita da dissertação, com base nas observações, experiências, e resultados obtidos nas fases anteriores.

## 1.7 Contribuições e Originalidades

O trabalho desenvolvido e apresentado nesta tese procura providenciar respostas às questões levantadas anteriormente e outras relacionadas, não tendo a pretensão de fornecer soluções definitivas, mas sim contribuir com uma pequena parcela de conhecimento que possibilite algum avanço científico nas áreas em estudo.

Deste trabalho obtiveram-se alguns resultados relacionados com os diversos objectivos previamente enunciados, sendo este documento e o protótipo desenvolvido a face mais visível desse esforço. Na sua prossecução foram abordados vários temas que vão desde os sistemas distribuídos, sistemas multiagente, sistemas holónicos, sistemas holónicos de produção e sistemas de produção baseados em agentes, até à programação em lógica e programação em lógica estendida, tendo esse conhecimento sido utilizado no desenvolvimento de um sistema de carácter experimental (*i.e.*, um protótipo) denominado *Fabricare*, que se aplica à resolução de problemas de escalonamento.

As principais contribuições e originalidades do presente trabalho são a seguir enunciadas:

- *Definição e especificação de uma arquitectura para sistemas holónicos de produção* – (objectivos 3 e 4). A secção 5.2.1 apresenta uma arquitectura baseada no paradigma dos Sistemas Holónicos para empresas de produção que abarca as áreas funcionais do fabrico (Projecto, Planeamento de Processos, Planeamento de Produção e Escalonamento), compras e vendas [Sousa e Ramos, 1997] [Sousa e Ramos, 1998] [Sousa *et al.*, 1999b]. Na secção 5.3 é especificada a base de conhecimento e na secção 6.3 o funcionamento de cada elemento da arquitectura. Sendo o escalonamento o caso escolhido para teste, é dada especial ênfase aos holons que possibilitam essa actividade, ou seja, os Holons de Tarefa e os Holons de Recurso. As originalidades desta

arquitectura centram-se nas entidades modeladas, na abordagem distribuída e descentralizada e no potencial da arquitectura para integração empresarial e integração inter-empresarial.

- *Notação para representação de informação incompleta* – (objectivo 5). A secção 5.4.1 apresenta uma notação para a representação de informação incompleta na forma de axiomas da base de conhecimento de cada holon [Sousa *et al.*, 2000b]. Com base em [Traylor e Gelfond, 1993] [Analide e Neves, 1996] [Neves *et al.*, 1997b] e utilizando a programação em lógica estendida (com representação explícita de informação negativa), essa notação permite a representação de nulos do tipo desconhecido, nulos desconhecidos de um conjunto finito de valores e nulos não permitidos. O facto de se abordar a problemática da informação incompleta nos sistemas de produção é original. A notação utilizada apresenta algumas alterações em relação à de Analide e Neves (1996), nomeadamente no que respeita à especificação de nulos não permitidos e à elaboração do meta-interpretador.
- *Identificação de situações de informação incompleta em sistemas de produção* – (objectivo 5). Na secção 5.4.2 são apresentados 46 casos identificados de situações onde pode existir falta de informação nas empresas de produção. Esses casos levam em linha de conta a base de conhecimento de cada holon identificado anteriormente e que consta da arquitectura proposta [Sousa *et al.*, 2000b]. Esta contribuição é original pois não se conhecem outros trabalhos que tenham efectuado um levantamento de situações de informação incompleta em sistemas de produção.
- *Extensão ao protocolo de rede de contrato com coordenação entre fornecedores de serviço* – (objectivo 6). A secção 5.4 apresenta o Protocolo de Rede de Contrato com Propagação de Restrições (PRCPR) [Sousa e Ramos, 1998] [Sousa *et al.*, 1999b] [Sousa e Ramos, 1999a] utilizado para regulamentar a interacção entre os Holons de Tarefa e os Holons de Recurso. Este protocolo é baseado no protocolo de rede de contrato, com duas novas funcionalidades, de tal modo que os vários holons fornecedores de serviços possam trocar informação entre si para coordenar as dependências temporais existentes entre as várias operações requisitadas pertencentes a uma mesma tarefa. Este protocolo apresenta um aspecto original, o de tratar explicitamente as fases de coordenação entre holons fornecedores de recursos. Contribui-se ainda com o estudo de complexidade do problema e do protocolo.
- *Concepção de um algoritmo distribuído para escalonamento* – como resultado colateral do protocolo RCPR obteve-se um algoritmo distribuído de escalonamento, baseado num esquema centralizado (*vide* secção 6.3.7) [Sousa *et al.*, 1999b]. Embora

este algoritmo se baseie no método descrito em [Almeida, 1995] e [Ramos *et al.*, 1995], a distribuição do algoritmo, as mudanças efectuadas ao nível da combinação de intervalos e a não utilização de comportamentos são originais.

- *Desenvolvimento de um protótipo* – (objectivo 7). Na secção 6.4 é apresentado o sistema *Fabricare* desenvolvido de acordo com a arquitectura dada (em termos de base de conhecimento e funcionamento) [Sousa *et al.*, 1999b] [Sousa *et al.*, 2000a]. Este protótipo é original pois corresponde à implementação da arquitectura que é proposta neste trabalho.

Nesta secção apresentou-se resumidamente o trabalho efectuado, tendo sido realçado em que é que contribuiu para o avanço do conhecimento bem como as suas originalidades. Nos capítulos subsequentes esse trabalho será melhor enquadrado e detalhadamente descrito.

## 1.8 Estrutura e Resumo da Dissertação

Esta secção apresenta a estrutura da dissertação, sendo apresentado um resumo do conteúdo de cada capítulo para fornecer uma noção geral do trabalho antes de entrar em detalhe na sua descrição.

A dissertação trata o tema das *abordagens inovadoras à actividade de produção*, e como tal numa **primeira parte** (capítulos 2, 3 e 4) torna-se necessário apresentar a produção e o fabrico propriamente dito, bem como o contexto socioeconómico da ‘Nova Economia’ e identificar problemas existentes nos sistemas de produção actuais. Na tentativa de solucionar esses problemas propõe-se então os *Sistemas Holónicos de Produção* e efectua-se um estudo dos paradigmas para a resolução de problemas que permitam implementar tais sistemas. Assim sendo, é abordado o tema genérico dos Sistemas Distribuídos Inteligentes, mais especificamente os *Sistemas Multiagente* e a problemática da interacção entre entidades computacionais autónomas. A *Programação em Lógica Estendida* é usada como ferramenta de representação de conhecimento e de implementação do protótipo. Na **segunda parte** (capítulos 5 e 6) é finalmente descrito o trabalho elaborado ao longo do Doutoramento, que pretende apresentar uma solução para os problemas detectados na primeira parte, utilizando os paradigmas descritos. Nestes capítulos vai então ser proposta uma arquitectura para sistemas de produção, arquitectura essa que será em seguida especificada em termos de conhecimento e de modos de operação.

O conteúdo de cada um dos sete capítulos em que a tese se encontra dividida é apresentado em seguida de forma mais detalhada.

O **Capítulo 1** enquadrou o trabalho realizado, apresentou a Questão central do trabalho e as hipóteses que apontam para uma solução do problema. Após a justificação do trabalho de

investigação foram apresentadas as diversas metodologias de trabalho, bem como os objectivos a atingir. Em seguida foram apresentadas as contribuições e originalidades do trabalho. Finalmente, é referida a organização estrutural e o conteúdo da dissertação.

O **Capítulo 2** introduz o campo de aplicação deste trabalho, isto é, os Sistemas de Produção, apresentando uma breve introdução do que é um sistema de produção, visto pela e na sociedade, quais os seus constituintes e quais as suas funções. Em seguida são apresentados conceitos fundamentais, tais como produto e processo. Torna-se necessário classificar diferentes tipos de Sistemas de Produção, pelo que se apresentam dois tipos de classificação possível, onde irão ser definidos conceitos como *job shop*, *flow shop*, produção por encomenda ou para existência. O fabrico é uma actividade complexa, na qual várias funções se inter-relacionam de forma a produzir os bens que a empresa fabrica. Assim sendo, são apresentadas as funções da actividade de fabrico: Gestão da Produção; Projecto; Planeamento de Processos; Planeamento da Produção; Escalonamento; e Execução, Inspeção e Controlo da Qualidade. Por fim é apresentada a Produção Integrada por Computador (CIM), como sendo uma metodologia para a competitividade e aumento da produtividade da empresa. Após uma breve introdução ao conceito CIM, são apresentados vários conceitos relacionados com o suporte tecnológico, tais como Sistemas Flexíveis de Fabrico (FMS), Projecto Assistido por Computador (CAD) ou Fabrico Assistido por Computador (CAM). Para terminar, são apresentados alguns aspectos das dificuldades de implementação do conceito CIM na prática.

No **Capítulo 3** faz-se uma apresentação das várias tendências observadas na sociedade que implicam novas maneiras de abordar os Sistemas de Produção. Este capítulo estende a secção 1.1 “Enquadramento”, apresentando de forma mais detalhada o contexto socioeconómico das últimas décadas do século XX. Esta época é chamada por muitos de época da ‘Nova Economia’ e por isso é importante apresentar definições, características e comparações com práticas correntes. Na secção 3.2.1 será apresentado um pequeno enquadramento histórico da produção e economia, bem como do contexto social e político desde o século XVIII até ao final do século XX. Esta secção serve de base à secção 3.2.2 onde se analisam as tendências de mercados e produção observados nos últimos 40 anos do século XX. Em seguida, após análise das mudanças e das novas características encontradas na sociedade e economia, será apresentado o contexto socioeconómico da ‘Nova Economia’, segundo as vertentes de Força Laboral; Responsabilidade Social e Ambiental; O Conhecimento como activo da Empresa; Dinamismo, Reactividade e Organização; e Revolução das Tecnologias de Informação. Desta apresentação importa realçar a importância cada vez maior de características como a *flexibilidade* e a *agilidade* e da importância crescente das tecnologias de informação como impulsionadoras de novas práticas de negócio. Apresentada a ‘Nova Economia’ interessa discutir aspectos relacionados com a produção neste novo contexto; para isso serão equacionados alguns dos problemas dos sistemas de produção actuais. Em seguida

irão ser apresentadas algumas visões de futuro para a produção, tendo como base as alterações ocorridas na sociedade e economia. Finalmente, elabora-se uma lista de características e requisitos a cumprir por uma nova geração de sistemas de produção para tentar combater as falhas actuais e responder aos desafios futuros.

O **Capítulo 4** apresenta uma abordagem inovadora aos sistemas de produção, os *Sistemas Holónicos de Produção* (HMS), que tenta colmatar as falhas identificadas nos sistemas de produção actuais, estando de acordo com a lista de características desejáveis nos sistemas de produção elaborada na secção 3.4.3 para responder aos requisitos actuais e futuros da sociedade e economia. Assim, começa-se por apresentar as origens filosóficas (que tentam explicar a evolução e organização de sistemas biológicos e sociais) dos sistemas holónicos e as suas características, com realce para a *distribuição*, *autonomia* e *cooperação*. Em seguida, são apresentadas as origens dos sistemas holónicos de produção no seio da comunidade internacional de investigadores, bem como as suas características. Os HMS não são a única abordagem inovadora aos sistemas de produção e por isso serão também sumariamente descritas outras abordagens, nomeadamente a *Fábrica Fractal* e a *Produção Biónica*. Na secção seguinte apresentam-se as metodologias a seguir para a concretização do sistema dando corpo ao conceito holónico: os *Sistemas Baseados em Agentes* e a *Programação em Lógica Estendida*. Assim, começa-se por apresentar o conceito de *agente* e as suas características, sendo em seguida apresentado o conceito de *sistema multiagente*. Na secção seguinte é apresentada a lógica como linguagem formal para especificação de agentes e a programação em lógica estendida (*i.e.*, com representação de negação explícita) para a codificação desses agentes. Finalmente, é apresentado um estado da arte na área dos Sistemas Holónicos de Produção e Sistemas de Produção Baseados em Agentes. Dos trabalhos escolhidos como referência será elaborada uma sinopse para evidenciar os pontos em que não há acordo com os objectivos enunciados nesta tese.

O **Capítulo 5** apresenta a arquitectura proposta tendo por base o conceito holónico descrito no Capítulo 4. Assim sendo, é efectuada uma análise funcional da produção, identificando os principais casos de utilização. Após a análise funcional, identificam-se quais as principais entidades do sistema e os seus relacionamentos básicos: *Fornecedor*, *Compra*, *Produto*, *Cliente*, *Venda*, *Tarefa* e *Recurso*. Na secção seguinte é então apresentada a arquitectura holónica proposta, constituída por holarquias para as funções de *Projecto*, *Planeamento de Processos*, *Planeamento da Produção*, *Escalonamento*, *Compras* e *Vendas*. Estas holarquias são constituídas por holons que representam os Produtos, Recursos, Tarefas, Fornecedores, Clientes, Compras e Vendas. Os vários holons constituintes de cada holarquia são especificados, na secção seguinte, em termos de base de conhecimento, ciclo de vida, objectivos e identificação. Na área da produção, existem várias situações onde toda a informação necessária pelo sistema não está disponível. Por esse motivo, após a apresentação de uma notação para a representação de



informação incompleta, a base de conhecimento de cada holon da arquitectura proposta será aumentada com as produções que lhe permitam representar essas situações.

No **Capítulo 6** será apresentado o protocolo de negociação que rege o processo de contratação de serviços entre Tarefas e Recursos, já que, devido à natureza distribuída da arquitectura proposta, torna-se necessário regulamentar a interacção entre os vários holons. Esse protocolo está preparado para o tratamento de excepções e principalmente para evitar o *Problema de Indecisão*. Em seguida será analisada a complexidade do protocolo no que se refere ao número de soluções encontradas, ao número de mensagens trocadas e ao tamanho total das mensagens trocadas. Após a descrição do protocolo será descrito o funcionamento de cada holon. Os principais algoritmos para a operação dos holons directamente relacionados com o escalonamento (*Holon de Tarefa*, *Holon de Recurso*) e outros holons auxiliares (*Holon de Serviço de Directórios*, *Holon de Produto* e *Holon de Escalonamento*) serão então apresentados e explicados. Em seguida, apresenta-se o protótipo de sistema informático implementado seguindo as descrições efectuadas no Capítulo 5 e no Capítulo 6. Este protótipo denominado *Fabricare* é composto por um conjunto de aplicações que incluem os Holons de Tarefa e de Recurso, bem como os holons auxiliares (Serviço de Directório, Planeamento de Processos, Escalonamento) e algumas ferramentas para a exploração do sistema, permitindo colocar em execução os Holons de Recurso e a criação de tarefas. Nesta secção serão incluídos alguns comentários às diferenças entre o método original de escalonamento e o método utilizado neste trabalho, bem como alguns comentários ao desenvolvimento do protótipo. Finalmente, será apresentada uma comparação entre o trabalho desenvolvido e os trabalhos de referência abordados anteriormente no “Estado da Arte”. Essa comparação é efectuada segundo quatro perspectivas de interesse, de acordo como os objectivos enunciados, nomeadamente a estrutura, a socialização das entidades, o tratamento de informação incompleta e o procedimento de escalonamento.

Finalmente, no **Capítulo 7** são apresentadas as conclusões. Assim, começa-se por fazer uma síntese do que foi dito nos capítulos de enquadramento referente à produção e aos seus problemas, bem como à sociedade actual e aos requisitos que coloca nos sistemas de produção. Em seguida serão detalhadas as contribuições e respectivas conclusões do trabalho que permitirão elaborar a *Tese* da dissertação e responder às questões colocadas na introdução. Finalmente, serão apresentadas as limitações do trabalho desenvolvido e as perspectivas de trabalho futuro, apontando as direcções que se pensa vir a trilhar.

No final do documento existem diversos **Apêndices** com informação adicional: o *Apêndice A* apresenta as experiências efectuadas e os resultados obtidos com o sistema *Fabricare*. No *Apêndice B* é apresentado o modelo matemático simplificado e respectiva folha de cálculo utilizada para a análise de complexidade do protocolo RCPR. O *Apêndice C* apresenta uma lista

de recursos existentes na Internet, tais como laboratórios, projectos de investigação e pessoas envolvidas nestas áreas ■