

## CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES

---



*Não tenho nenhuma solução, mas é certo que admiro o problema*

Ashleigh Brilliant (1933 – ) escritor, cartunista, professor de história e “filósofo de rua” Inglês a viver nos EUA.

**T**entou-se com este trabalho contribuir para o aumento do conhecimento científico na área dos Sistemas Inteligentes para Produção, mais concretamente nos Sistemas Holónicos de Produção. Conforme foi referido no início da dissertação, não se pretende apresentar soluções definitivas, mas sim algumas soluções pontuais, sendo neste caso o sistema *Fabricare* a face mais exposta das contribuições deste trabalho.

Para terminar a apresentação de qualquer trabalho é conveniente salientar as conclusões alcançadas, bem como criticar as suas limitações e apontar perspectivas futuras. 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 detalha-se as contribuições e respectivas conclusões do trabalho que permitem elaborar a *Tese* da dissertação e responder às questões colocadas na introdução. Finalmente, serão apresentadas as limitações do trabalho desenvolvido e as perspectivas de desenvolvimento futuro apontando as direcções em que se pensa seguir.

## 7.1 Síntese da Dissertação

No Capítulo 2 foi apresentado o tema da Produção e foram descritos os conceitos e sistemas normalmente utilizados, como por exemplo, a Produção Integrada por Computador (CIM). No Capítulo 3 foi apresentado o contexto socioeconómico dos nossos dias, evidenciando os desafios impostos à produção e terminando com a elaboração de uma lista de propriedades desejáveis para uma nova geração de sistemas de produção (secção 3.4.3). Assim, na secção 3.1 caracterizou-se o actual contexto socioeconómico em termos gerais (mercados dinâmicos, competição a nível global, estruturas empresariais em rede e predominância de alianças e colaborações com outras empresas) e, em termos de indústria (mudança da produção em massa para o fabrico flexível, reconhecimento da inovação e importância da investigação na criação de vantagem competitiva e fonte de crescimento da empresa).

A par destas características é possível observar certas tendências em termos gerais de mercados e também na área de produção [Hunt, 1989] [Kusiak, 1990] [Solberg e Kashyap, 1993] [Kalpakjian, 1995] [ISC, 1994]:

- *Produtos* – redução do ciclo de vida e da dimensão das encomendas; aumento da variedade e da complexidade com maiores requisitos de qualidade;
- *Processos* – incremento de opções em termos de materiais e processos; avanços tecnológicos mais rápidos; aumento da diversidade tecnológica; aumento do número de instalações produtivas a nível mundial; redução do tempo de colocação no mercado; necessidade de preservação de recursos naturais; restrições ambientais;
- *Práticas de gestão e factores humanos* – novas estruturas organizacionais e filosofias de trabalho (*e.g.*, teletrabalho); incremento de parcerias;
- *Mercados* – crescente globalização de mercados; as condições de mercado flutuam de forma significativa; mercados complexos e altamente competitivos; alargamento e globalização das cadeias de fornecimento;
- *Clientes* – menor fidelidade dos clientes; pretendem participação mais significativa na concepção do produto; pretendem produtos de elevada qualidade e custo reduzido; pretendem personalização de produtos para necessidades específicas.

Estas mudanças na sociedade e na economia impõem mudanças nos sistemas de produção pois, embora a Produção Integrada por Computador seja promovida universalmente, foram detectados alguns problemas no seu processo de implementação (*e.g.*, custo elevado) sendo opinião corrente que o CIM não é a resposta para os sistemas de produção do futuro.

Entre outros, foram identificados os seguintes problemas na Produção Integrada por Computador [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 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 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 em constante mudança [Kádár *et al.*, 1998].

Além dos problemas dos sistemas de produção actuais em responder às tendências observadas, os sistemas de produção também devem estar preparados para o que virá a ser a produção. Pensa-se que no futuro a produção será caracterizada por [NGM, 1997] [CVM, 1999]:

- recursos de produção distribuídos à escala planetária;
- requisitos de procura de pouca quantidade e muita variedade de produtos;
- fornecimento de soluções individuais de acordo com as necessidades específicas de cada cliente;
- integração e execução concorrente de todas as actividades da empresa;
- definição de competências nucleares e agregação temporária com outras empresas possuindo outras competências de forma a criar um todo harmonioso.

Dadas as tendências observadas nos mercados, os problemas com as actuais arquitecturas dos sistemas de produção e as previsões do que será a produção no futuro, conclui-se que a nova geração de sistemas de produção deve caracterizar-se pelas seguintes propriedades [Sousa *et al.*, 2000c] [Sousa *et al.*, 2000b]:

- *Distribuição* – o sistema deixa de ser monolítico e passa a ser constituído por várias entidades;
- *Descentralização* – as funcionalidades estão repartidas por várias entidades do sistema;

- *Autonomia* – cada entidade do sistema possui capacidade de decisão e controlo sobre a execução das suas acções;
- *Dinamismo* – o estado do sistema não é estático, mudando constantemente no que refere à estrutura, comportamentos e relações entre entidades;
- *Reactividade* – a selecção de acções é feita de acordo com as suas percepções;
- *Flexibilidade* – capacidade dos recursos efectuarem rapidamente uma mudança de processos (definidos *a priori*) com base no produto a fabricar;
- *Adaptabilidade* – capacidade que o sistema exhibe de continuar em funcionamento perante mudanças e perturbações de forma a responder às necessidades de produção e restrições momentâneas da instalação fabril;
- *Agilidade* – evolução contínua e aproveitamento de oportunidades de negócio esporádicas e instantâneas, através de alianças estratégicas;
- *Informação Incompleta* – por forma a melhor se aproximar da realidade.

Para tentar responder a estes requisitos, no Capítulo 4 foi apresentada a Teoria dos Sistemas Holónicos e mais concretamente, os Sistemas Holónicos de Produção. Este tipo de sistemas foi proposto como solução para os problemas encontrados nos sistemas de produção actuais, possuindo as características enunciadas para o desenvolvimento de novos sistemas de produção. Neste capítulo foram também apresentados os conceitos de Sistema Multiagente e de Programação em Lógica Estendida como ferramentas de implementação de tais sistemas.

Um *Sistema Holónico de Produção* (HMS) é uma holarquia que abarca a totalidade das actividades de produção desde o projecto até à venda, passando pelo fabrico, *marketing* e recepção de encomendas, para alcançar a empresa ágil de produção [Valckenaers *et al.*, 1997] [Bongaerts, 1998]. As características pertinentes de um HMS são [HMSC, URL]:

- elementos autónomos, cooperativos, reutilizáveis e autoconfiguráveis (*i.e.*, os holons);
- estrutura recursiva dos elementos (a dualidade natural dos holons);
- reconhecimento do papel importante das pessoas para o sucesso global;
- inexistência de controlo central na instalação fabril;
- integração de trabalho humano nas células de fabrico.

Do estudo dos Sistemas Holónicos em geral e dos Sistemas Holónicos de Produção em particular, conclui-se que os referidos sistemas, isto é, os HMS, possuem características intrínsecas (*e.g.*, autonomia, cooperação) que lhes permitem exibir as propriedades identificadas como requisitos da nova geração de sistemas de produção, nomeadamente:

- *Distribuição* – os holons são por definição distribuídos;
- *Descentralização* – através da autonomia e descentralização de funções no “desenho” do sistema;
- *Autonomia* – os holons são por definição autónomos;
- *Dinamismo* – através das holarquias dinâmicas;
- *Reactividade* – implementada na concepção do sistema;
- *Flexibilidade* – através da autonomia dos holons e holarquias dinâmicas;
- *Adaptabilidade* – através da autonomia dos holons e holarquias dinâmicas;
- *Agilidade* – através das holarquias dinâmicas e cooperação entre holons.

Após a descrição do conceito holónico importa abordar a problemática da sua implementação, tendo sido por isso apresentados na secção 4.4 dois mecanismos para a concretização de sistemas holónicos: *sistemas multiagente* e *programação em lógica estendida*.

É fácil estabelecer um paralelo entre holons e agentes e entre sistemas holónicos e sistemas multiagente já que há uma certa sobreposição nas características de ambos os conceitos, sendo assim, como um sistema multiagente exibe as mesmas características identificadas num sistema holónico (à excepção da estrutura holárquica) pode então ser utilizado para implementação de Sistemas Holónicos de Produção. É assim possível afirmar que:

- um holon pode ser implementado recorrendo à tecnologia dos agentes;
- até certo ponto um holon é um agente com capacidade de agregação temporária e intermediário com Humanos;
- o conceito holónico oferece a visão e a estrutura organizacional ao passo que o conceito de agência oferece a tecnologia que possibilita a implementação de tais sistemas.

Para a construção de sistemas inteligentes há que considerar a problemática da representação e inferência de conhecimento. As linguagens lógicas podem ser usadas com sucesso nesse sentido [Wooldridge, 1992] [Russell e Norvig, 1995], além disso, a Lógica pode ser usada com sucesso como uma linguagem formal para a especificação de agentes, assim como a Programação em Lógica pode ser usada para a sua implementação. No entanto, o pressuposto do mundo fechado e o pressuposto do domínio fechado, utilizados na Programação em Lógica clássica, embora

simplifiquem o desenvolvimento de sistemas inteligentes, limitam o seu campo de aplicação, pois na maioria dos casos o conhecimento total do domínio é impossível de ser obtido. Sendo que é normal a ocorrência de cenários de *Informação Incompleta* nas bases de conhecimento e nos processos de negociação [Neves, 1984] [Traylor e Gelfond, 1993] [Neves *et al.*, 1997b], os sistemas reais podem beneficiar largamente de abordagens que evitem estas limitações.

Sugeriu-se então a Programação em Lógica Estendida (programação em lógica com representação de informação negativa explícita) para a implementação dos agentes/holons, concluindo-se que:

- ao adicionar a 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 utilização da programação em lógica estendida com o meta-interpretador apresentado (Figura 4.5), permite a representação e manipulação de nulos, nomeadamente *nulos desconhecidos*, *nulos mutuamente exclusivos* e *nulos não permitidos* na base de conhecimento de um agente.

Reunidas estas valências (sistemas holónicos, sistemas multiagente, programação em lógica estendida) partiu-se então para a concepção de um sistema, denominado *Fabricare*, que exhibisse as características enunciadas e (pelo menos teoricamente) fosse capaz de responder aos desafios impostos ao sector produtivo numa sociedade em constante mudança.

Assim, no Capítulo 5 definiu-se uma arquitectura holónica para empresas de produção, constituída por holons que modelam as principais entidades de negócio (*i.e.*, clientes, vendas, fornecedores, compras, produtos, recursos e tarefas [Sousa *et al.*, 2000a]), possuindo as várias funcionalidades da actividade de produção (*e.g.*, escalonamento). Ainda neste capítulo, esses holons foram especificados em termos de base de conhecimento (incluindo a representação dos cenários identificados de informação incompleta).

Após a especificação do sistema, definiu-se o seu funcionamento no Capítulo 6, onde também se definiu um protocolo de negociação entre os holons de Tarefa e de Recurso com vista ao escalonamento das ordens de fabrico. Este protocolo baseia-se no protocolo de rede de contrato [Smith, 1980] [Davis e Smith, 1983] que é estendido para garantir as dependências temporais entre as operações da tarefa. Por fim, desenvolveu-se um protótipo para a actividade de escalonamento de acordo com a arquitectura, protocolo e operação definidos anteriormente.

## 7.2 Contribuições, Conclusões e Originalidades

Os objectivos definidos para o trabalho na secção 1.5 foram atingidos quase na totalidade, tendo a excepção sido o objectivo 5 (representação e manipulação de informação incompleta) que foi apenas parcialmente atingido, já que a utilização de informação incompleta no processo de decisão/operação dos holons é reduzida – o único holon que de facto utiliza o axioma *demo* é o Holon de Serviços de Directório ao responder a perguntas do tipo *faz(Holon, Habilidade)*.

Do resultado deste trabalho surgiram várias contribuições (relacionadas com os objectivos enunciados) que são apresentadas em seguida.

---

**Contribuição** – *Definição de uma arquitectura para sistemas holónicos de produção.*

---

Esta contribuição responde aos objectivos 3 e 4 (especificação de uma arquitectura e especificação de cada entidade constituinte da arquitectura, respectivamente) ao especificar uma arquitectura holónica que permite responder aos requisitos impostos (Figura 7.1).

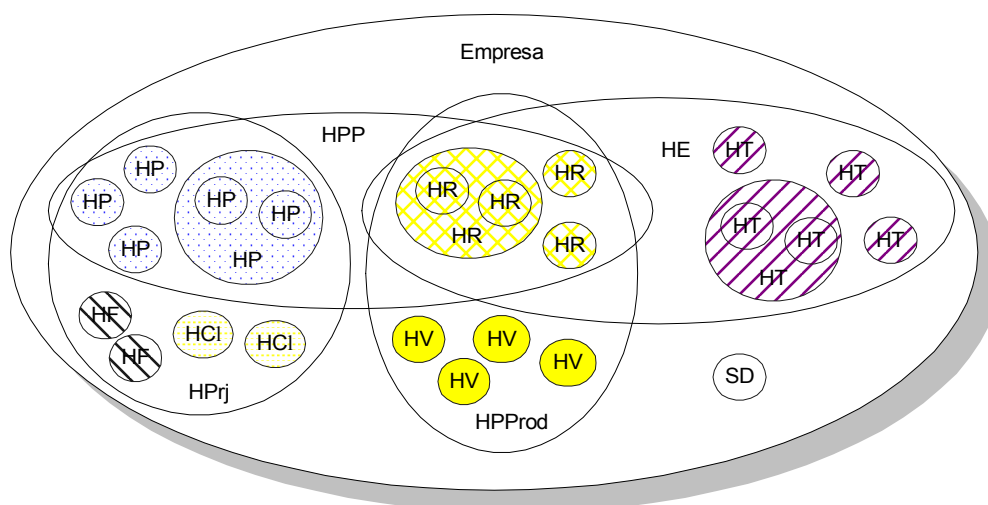


Figura 7.1 – Arquitectura holónica proposta (actividades de fabrico)

A arquitectura foi proposta na secção 5.2 sendo baseada no paradigma dos Sistemas Holónicos e 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 foi especificada a base de conhecimento e na secção 6.3 o funcionamento de cada holon da arquitectura. Sendo o escalonamento o caso de

teste escolhido, foi dada especial ênfase aos holons que possibilitam essa actividade, ou seja, os Holons de Tarefa e os Holons de Recurso.

Da arquitectura proposta conclui-se que:

- as principais entidades identificadas são: produtos, recursos, tarefas, compras, fornecedores, vendas e clientes. Enquanto outros trabalhos baseiam-se apenas na utilização da abstracção ‘Recurso’, esta proposta identifica outras entidades, tendo como principal vantagem a especialização de cada agente de acordo com um domínio (*e.g.*, tarefas, produto);
- a arquitectura proposta permite efectuar as seguintes actividades de produção: projecto, planeamento de processo, planeamento de produção, escalonamento, gestão de compras e gestão de vendas;
- as entidades principais são representadas como holons;
- as actividades de produção são representadas como holarquias;
- assenta numa abordagem distribuída e descentralizada procurando evitar elementos centralizadores de funções e favorecendo a coordenação/cooperação de vários holons para a emergência de funcionalidades;
- devido à natureza recorrente da estrutura holónica, a arquitectura proposta pode ser empregue a diversos níveis de detalhe (*e.g.*, instalação fabril vs. instalações fabris), assemelhando-se assim a um fractal e mostrando auto-semelhança;
- os holons suportam herança de conhecimento e de comportamentos (através dos axiomas *demo\_α* e *tipo*);
- as holarquias criadas dinamicamente em resposta a eventos no sistema correspondem às características de dinamismo, adaptabilidade e agilidade enunciadas como requisitos para os sistemas de produção de nova geração;
- as holarquias são apetrechadas de mecanismos que facilitam as comunicações entre os seus membros (memória partilhada, “quadro negro”) e permitem obter uma visão global do subproblema em questão;
- é necessário um mecanismo que permita a identificação dos vários holons existentes, papel desempenhado pelo Holon de Serviços de directório, que além disso permite que o sistema seja flexível no que toca aos elementos existentes, ou seja, nenhum dos holons sabe à partida com que holons comunicar, mas obtém essa informação dinamicamente.



*As originalidades desta arquitectura centram-se nas entidades modeladas, na abordagem distribuída e descentralizada e nas valências da arquitectura para integração empresarial e integração inter-empresarial.*

---

**Contribuição** – *Notação para a representação (e demonstração de teoremas) com informação incompleta.*

---

A secção 5.4.1 apresenta uma notação para representação de informação incompleta tendo como base os axiomas da base de conhecimento de cada holon [Sousa *et al.*, 2000b], de acordo com o objectivo 5. 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.

Na área da produção existem várias situações onde toda a informação necessária pelo sistema não está disponível (informação incompleta). Embora esta informação não esteja completamente definida, tornando assim impossível a sua utilização, o facto de ela existir no sistema é mais útil do que a sua não existência ao permitir uma melhor representação do mundo real. Da componente de informação incompleta deste trabalho pode concluir-se que:

- a notação utilizada permite a representação dos seguintes tipos de informação incompleta: negação explícita; nulos desconhecidos; nulos mutuamente exclusivos; e nulos não permitidos;
- o demonstrador utilizado permite inferir o valor de verdade de uma conjunção de termos lógicos com base numa teoria que contenha nulos destes quatro tipos;
- é possível a representação de nulos desconhecidos e nulos mutuamente exclusivos para um mesmo tipo de axioma (e.g., para uma produção do tipo *encomenda(Cliente, ListaProdutos)* é possível representar situações em que não se sabe quem encomendou e situações em que não se sabe quem entre dois clientes encomendou determinado produto).

*O facto de se abordar a problemática da informação incompleta nos sistemas de produção é original. A notação utilizada, embora não seja totalmente original, apresenta algumas alterações em relação a [Analide e Neves, 1996], nomeadamente na representação de nulos não permitidos e no meta-interpretador.*

---

**Contribuição** – *Identificação de situações de informação incompleta em sistemas de produção.*

---

Continuando na prossecução do objectivo 5, na secção 5.4.2 apresentou-se o resultado do levantamento 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 na arquitectura proposta [Sousa *et al.*, 2000b].

Dos casos de informação incompleta identificados neste trabalho pode concluir-se que:

- foram identificados 46 casos de informação incompleta nos sistemas de produção em geral e na base de conhecimento de cada holon da arquitectura proposta em particular;
- os casos identificados foram representados nas bases de conhecimento de cada holon objecto de implementação;
- a utilização de informação incompleta nos processo de funcionamento de cada holon é ainda limitada, ficando-se pelo Holon de Serviços de Directório.

*Esta contribuição é original pois não se conhecem outros trabalhos que tenham efectuado um levantamento de situações de informação incompleta em sistemas de produção.*

---

**Contribuição** – *Extensão ao protocolo de rede de contrato com cooperação entre fornecedores de serviços.*

---

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 (objectivo 6).

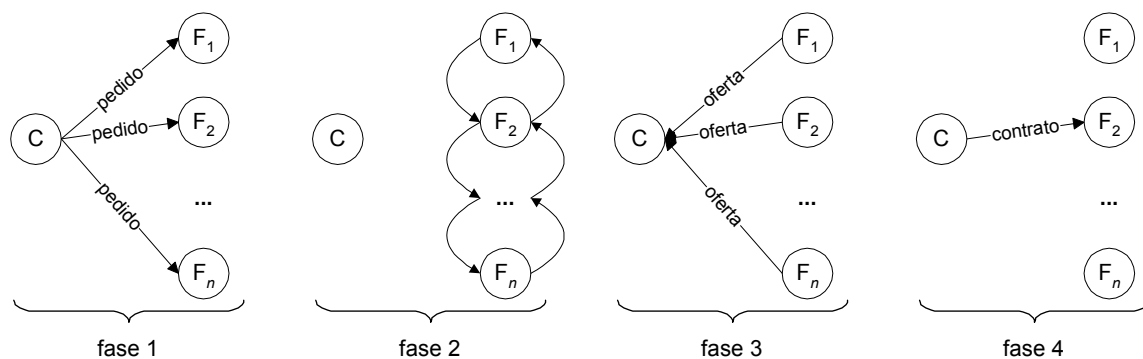


Figura 7.2 – Protocolo RCPR

A Figura 7.2 dá uma visão geral do Protocolo de Rede de Contrato com Propagação de Restrições utilizado no sistema. Este protocolo estende o Protocolo de Rede de Contrato [Smith, 1980] [Davis e Smith, 1983] ao incluir troca de informação entre os diferentes fornecedores de serviços (fase 2) para coordenar as dependências temporais existentes entre as várias operações requisitadas pertencentes a uma mesma tarefa.

O Protocolo de Rede de Contrato com Propagação de Restrições que pode ser caracterizado por:

- utilização de duas abstracções Recurso e Tarefa que permitem antever outras utilizações do protocolo que não no escalonamento de tarefas industriais;
- basear-se no protocolo de rede de contrato, mas incluindo cooperação explícita entre fornecedores de serviços (*i.e.*, os recursos) motivado pela necessidade de coordenação das dependências temporais entre as várias operações a executar numa tarefa;
- ser dinâmico no que toca aos intervenientes através da obtenção de informação sobre os holons capazes de executar cada operação necessária bem como do plano de produção;
- estar preparado para evitar conflitos entre tarefas, negociando intervalos de tempo sobrepostos num mesmo recurso (Problema de Indecisão) recorrendo à intervenção da holarquia de escalonamento na serialização das negociações;
- a existência de recursos alternativos para uma mesma operação pode originar uma explosão combinatória do espaço de soluções;
- adicionalmente, foi apresentado um método para o cálculo do número de soluções possíveis considerando um determinado plano e o número de recursos para cada operação desse plano;
- o número de mensagens trocadas cresce exponencialmente com o número de operações do plano.

Devido à explosão combinatória de soluções possíveis quando existem recursos alternativos para uma mesma operação, o protocolo RCPR original foi modificado para reduzir o número de mensagens transmitidas, concluindo-se que:

- a nova variante do protocolo tem uma evolução linear do número de mensagens transmitidas dependente do número de operações do plano;
- o ganho relativo em termos de número de mensagens trocadas desta variante do PRCPR em relação ao PRCPR original vai aumentando na proporção directa do número de operações;

- o tamanho de cada mensagem trocada (mais especificamente das mensagens de influência directa, influência inversa e proposta) é maior nesta variante do que no PRCPR original, devido à concatenação de várias soluções numa só mensagem;
- embora sejam maiores, o comprimento total das mensagens trocadas é menor na variante do PRCPR do que no PRCPR original; no entanto, o ganho relativo em termos de comprimento total de mensagens vai diminuindo com o aumento do número de operações.

*Este protocolo apresenta um aspecto original ao incluir explicitamente as fases de coordenação entre holons fornecedores de recursos. Adicionalmente, contribui-se com o estudo de complexidade do problema e do protocolo.*

---

**Contribuição** – *Concepção de um algoritmo distribuído para escalonamento.*

---

Como resultado colateral do PRCPR obteve-se um algoritmo distribuído para escalonamento dinâmico de tarefas industriais (*vide* secção 6.3.7) [Sousa *et al.*, 1999b], baseado num método centralizado, originalmente proposto por Almeida (1995) e Ramos *et al.* (1995). Este algoritmo pode ser caracterizado por:

- utilização de uma *abordagem distribuída* com vários processos computacionais (*i.e.*, os holons) efectuando partes do cálculo e conhecendo apenas parte dos dados do problema;
- utilização de *custos por operação por recurso* que contribui com mais um parâmetro para obtenção de soluções diferentes;
- possibilidade de existência de *múltiplos recursos para a execução de cada operação*, criando por isso várias alternativas para o escalonamento de uma tarefa tendo em conta as agendas de actividades de cada recurso e o tempo e o custo de execução de cada operação com os vários recursos alternativos;
- possibilidade de utilização de *um mesmo recurso em mais que uma operação* do plano;
- *não utilização de “comportamentos”* o que permite maior flexibilidade no tempo que medeia entre operações, o que implica porém a existência de *buffers* (assumidos de tamanho infinito);
- não consideração dos tempos de *setup* nem de transporte;

- utilização de um *operador de limitação inferior e superior* de agendas de intervalos para as fases de influência directa e inversa;
- *escolha de intervalos de escalonamento* com base em algum critério previamente definido (de momento os critérios definidos são: primeira proposta, proposta com menor custo e proposta com maior folga).

*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.*

---

### Contribuição – Desenvolvimento de um protótipo.

---

Para a validação dos conceitos e da arquitectura proposta neste trabalho e dando resposta ao objectivo 7, desenvolveu-se um sistema de carácter experimental (*i.e.*, um protótipo) denominado *Fabricare* (Figura 7.3, vide secção 6.3.7) desenvolvido de acordo com a arquitectura proposta (em termos de base de conhecimento e funcionamento) [Sousa et al., 1999b] [Sousa et al., 2000a].

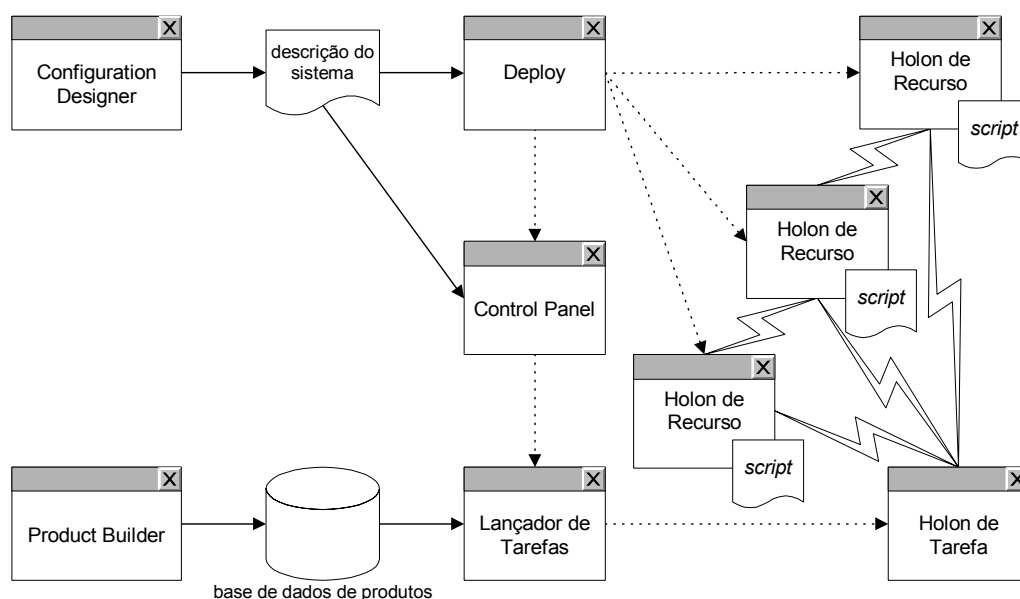


Figura 7.3 – Vista geral do protótipo *Fabricare*

O protótipo *Fabricare* pode ser caracterizado por:

- ser uma aplicação distribuída baseada nos paradigmas dos Sistemas Multiagente e dos Sistemas Holónicos;

- consistir numa série de aplicações divididas em três grandes grupos: directamente relacionadas com os holons da arquitectura; suporte ao funcionamento; e suporte à exploração do sistema;
- implementação dos Holons de Tarefa, Holons de Recurso, Holon de Escalonamento (apenas tratamento de conflitos), Holon de Planeamento de Processos (apenas obtenção de planos de produção) e Holons de Produto (simulados pelo Holon de Planeamento de Processos);
- utilização da linguagem de programação em lógica SICStus PROLOG para a implementação dos Programas em Lógica Estendida que compõem cada holon;
- utilização de Visual Basic para a interface gráfica com o utilizador;
- separação do conhecimento do controlo de cada holon, na forma: no Holon de Tarefa a informação acerca das tarefas a executar é obtida através da mensagem de anúncio; no Holon de Recurso através do *script* de cada recurso; e no Holon de Produto através do plano de produção;
- ser aberto e flexível no que toca ao número de holons em execução no sistema; *i.e.*, podem ser acrescentados novos holons de Tarefa, de Recurso e de Produto sem parar a execução do sistema e esses holons serão reconhecidos daí em diante (através do registo no Holon de Serviços de Directório);
- o sistema permite a utilização de vários critérios de selecção para a escolha de propostas, sendo inclusive extensível via *script*, permitindo a inclusão de novos algoritmos de selecção, o que permite pensar em critérios combinados (*e.g.*, menor custo com maior folga);
- utilização de um “quadro negro” como mecanismo de comunicação, simplificando o desenvolvimento dos diversos holons, embora introduza um elemento centralizador no sistema, o que pode gerar um “gargalo” de eficiência.

*Este protótipo é original pois corresponde à implementação da arquitectura (original) que é proposta neste trabalho.*

Nesta secção foram apresentadas as conclusões, bem como as contribuições do presente trabalho para o avanço do conhecimento e respectivas originalidades.

### 7.3 Tese

O problema que se tentou equacionar e resolver com este trabalho foi enunciado na forma de uma questão na secção 1.2 (transcrita em seguida).

---

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

---

De forma sucinta tudo o que foi dito ao longo deste trabalho traduz-se na tese enunciada de seguida:

---

**Tese** – *A divisão dos Sistemas de 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, defendeu-se que para fazer face à crescente personalização de bens de consumo e outras tendências da ‘Nova Economia’ (e.g., crescente complexidade de produtos com redução do ciclo de vida), é necessário construir sistemas que exibam características próprias, nomeadamente, distribuição e descentralização, autonomia, dinamismo, reactividade, flexibilidade, adaptabilidade e agilidade. Os actuais sistemas de produção integrada por computador não possuem tais características e mostram-se aquém das expectativas; no entanto, todas estas características podem ser observadas em sistemas construídos de acordo com a teoria dos sistemas holónicos. Esta teoria identifica uma entidade fundamental em todas as estruturas sociais e biológicas denominada *holon*, que é autónoma e cooperante com outros holons, sendo constituída por outros holons e fazendo parte de outros holons, apresentando por isso uma dualidade todo/parte que permite criar formas intermédias estáveis em sistemas complexos. Os sistemas holónicos de produção aplicam tais princípios aos sistemas de produção, sendo por isso o modelo sugerido para a construção de novos sistemas de produção de forma a responder aos requisitos em constante mudança que são colocados à empresa, sendo a sua grande vantagem (pelo menos teórica) a autonomia de cada holon e a sua estruturação dinâmica *ad hoc* em holarquias, permitindo assim o agrupamento de holons e a criação de subsistemas estáveis.

Na secção 1.5 foram apresentadas algumas questões adicionais que, embora já parcialmente respondidas ao longo do trabalho, serão agora abordadas de forma mais explícita.

- *Que suporte tecnológico se deve usar para a realização de sistemas de acordo com a Teoria dos Sistemas Holónicos?* – conforme o que foi já apresentado, o suporte tecnológico utilizado neste trabalho passa pela programação em lógica estendida e pelos sistemas multiagente. Esta abordagem não é obviamente a única, sendo possível recorrer a outras ferramentas, nomeadamente no que toca a linguagens de programação. No entanto, uma característica comum a todos os trabalhos que advogam a arquitectura holónica é o facto de se relacionarem com os sistemas multiagente.
- *Será possível utilizar a estrutura holónica noutras áreas que não a da Produção?* – a estrutura holónica tem as suas origens na observação de sistemas biológicos e sociais, sendo suficientemente genérica para ser utilizada noutras áreas que não a produção, em que a complexidade do sistema a desenvolver beneficie do conceito de holon como bloco de construção. Quanto à arquitectura proposta neste trabalho, é opinião do autor que a componente de escalonamento poderá ser utilizada noutras aplicações que não apenas a produção, nomeadamente em:
  - no escalonamento de projectos de construção civil, já que existem vários recursos e diferentes operações a executar, normalmente de uma única tarefa;
  - no comércio electrónico, usando tarefas que consistem apenas de uma operação (*i.e.*, comprar) e representando os vendedores como recursos, que dão as ordens de compra, indicando o custo e o prazo de entrega;
  - na atribuição de tempo de processamento a um programa numa rede de processadores, considerando para tal os processadores como recursos e o programa como tarefa, cujas operações são as unidades de código (*e.g.*, funções) a executar.
- *Que holons e holarquias há que definir de forma a abordar as várias actividades da produção de forma integrada?* – as entidades escolhidas para modelar o sistema foram os recursos, produtos e tarefas, os clientes e as vendas, os fornecedores e as compras. A escolha destas entidades deveu-se à análise efectuada das funções de fabrico e das funções comerciais, tendo sido identificados estes conceitos/entidades de negócio.
- *Existirão cenários de falta de informação e conhecimento nas actividades de produção? Se sim, quais?* – conforme foi apresentado na secção 5.4.2 existem vários cenários de falta de informação nos sistemas de produção. Os cenários identificados são fruto da experiência empírica do autor e do bom senso, sendo necessário de futuro fundamentar tais cenários com a escolha de situações reais.



- *De que forma deverão os vários elementos da arquitectura comunicar e interagir entre si?* – a interacção dos holons do sistema é feita através de um protocolo de negociação concebido propositadamente para este trabalho. A escolha de um mecanismo de negociação ao invés de um mecanismo pedido/resposta ou *master/slave* deve-se ao entendimento de que a flexibilidade e a independência (entre holons) conseguidas dessa forma são maiores.
- *Como saberão os vários elementos da existência de outros elementos?* – a informação sobre os holons existentes (em execução) no sistema é obtida através de um holon especial que implementa um serviço de directório. O conhecimento acerca da existência deste holon faz parte de cada holon, bem como as regras que definem o registo de funcionalidades no serviço de directório para assim poder ser requisitado por outros holons.
- *Como assegurar a coerência das decisões tomadas por cada elemento?* – no presente trabalho, a coerência de acções prende-se essencialmente com a relação de precedência temporal entre as operações de uma mesma tarefa, que é garantida pelo facto do protocolo de negociação utilizado incluir procedimentos explicitamente destinados para esse efeito.
- *Como formular, descrever e decompor o problema?* – podem ser considerados dois níveis neste trabalho; *i.e.*, a produção como um todo e o caso específico do escalonamento. Essencialmente foi feita uma descrição textual em termos de funcionalidades e de informação necessária às grandes entidades do sistema para suportar as várias actividades da produção. No caso do problema de escalonamento, a sua descrição é essencialmente efectuada pelo anúncio de tarefa, objecto de negociação, operação a operação, tendo em linha de conta os vários recursos existentes.

## 7.4 Limitações e Trabalho Futuro

O trabalho aqui apresentado tem algumas limitações (aliás dificilmente um qualquer sistema pode ser considerado como acabado e completo) que ao serem identificadas, permitem estabelecer boas perspectivas de desenvolvimento futuro.

De seguida apresentam-se algumas dessas limitações bem como sugestões sobre a forma de as ultrapassar, para além de algumas indicações sobre trabalho futuro:

- uma das grandes limitações do protótipo centra-se na falta de carácter temporal; *i.e.*, a inexistência de um “relógio interno” que modele a dinâmica do tempo no funcionamento de cada holon. Actualmente, o protótipo pode ser usado como um

escalonamento *a priori*. No entanto, a inclusão do ciclo de acompanhamento nos Holons de Tarefa e nos holons de Recurso (mesmo que simulado) permitiria desde já (embora de forma limitada) colmatar esta falha. A dinâmica temporal do sistema é um aspecto extremamente importante e será certamente alvo de trabalho futuro. Em termos conceptuais pensa-se que a utilização de *Extensões Temporais da Programação em Lógica* permitam modelar esse comportamento.

- a explosão combinatória do problema quando existem vários recursos alternativos pode tornar inviável a obtenção de uma solução em tempo útil. Aliás, essa é uma das limitações do sistema actual, pois não considera um limite máximo de tempo para gerar o escalonamento (uma situação normal quando se pretende efectuar escalonamento dinâmico *online*). Este será sem dúvida mais um dos focos de atenção em termos de trabalho futuro. O *Raciocínio Difuso* é uma solução possível para este problema, permitindo a criação de meta-regras baseadas na complexidade do problema e no tempo disponível para encontrar a solução, de forma a conduzir o processo de selecção de recursos a contactar (Figura 7.4).

**se** a complexidade do problema é elevada  
**e** o tempo disponível é extremamente reduzido  
**então** selecciona apenas um dos recursos menos ocupados para cada operação

**se** a complexidade do problema é elevada  
**e** o tempo disponível é reduzido  
**então** selecciona um subconjunto de recursos menos ocupados

**se** ( a complexidade do problema é média  
**e** o tempo disponível é aceitável )  
**ou** ( a complexidade do problema é elevada  
**e** o tempo disponível é alargado )  
**então** selecciona todos os recursos

*Figura 7.4 – Exemplos de meta-regras para selecção de recursos*

- também relacionado com a explosão combinatória e no sentido de minimizar o espaço de pesquisa, deve ser feito um estudo na tentativa de reduzir o número de combinações. Uma possibilidade, inspirada no algoritmo A\*, é a utilização de um limite máximo de custo imposto pela tarefa e a consideração de custos parciais acumulados pelos recursos. Dessa forma, quando uma combinação parcial ultrapassa-se o limite imposto poderia ser abandonada, evitando assim a propagação de soluções “inviáveis”. De forma semelhante, o funcionamento dos Holons de Recurso poderia também ser modificado para retirar do espaço de soluções as combinações irrealizáveis, ou seja, aquelas que resultam num conjunto vazio de intervalos para um dos recursos.

- embora os holons do sistema possuam a capacidade de representar e manipular informação incompleta nas suas bases de conhecimento, a utilização desse tipo de informação no processo de decisão/operação é ainda limitado. Um dos usos de informação incompleta com maior potencial, na opinião do autor, é o planeamento de produção a médio/longo prazo. Nesta actividade, pode-se então levar em linha de conta as encomendas subespecificadas, considerando informação estatística sobre a utilização de materiais e duração das operações para efectuar um plano prévio e tentar assim antever problemas de falta de capacidade ou material.
- os casos identificados de Informação Incompleta são baseados no bom senso e no conhecimento empírico. De futuro seria vantajoso fundamentar tais casos, bem como casos adicionais, com base num inquérito e em entrevistas com os responsáveis a vários níveis ( direcção geral, direcção de produção, operários) nas empresas.
- uma outra hipótese de trabalho futuro corresponde à modelação dos custos de operação dos holons. Os custos aqui referidos não se prendem com o custo de fabrico, pois isso sai fora do âmbito do trabalho, mas sim de custos em “ciber-euros” que de alguma forma permitam representar uma Economia formada pelos diversos holons. A função de custo de cada holon poderia então depender da situação do “mercado”; *e.g.*, um Holon de Recurso muito requisitado poderia aumentar os seus preços ao passo que um outro holon pouco requisitado poderia diminui-los (lei da oferta e da procura). Adicionalmente, cada holon poderia ter uma certa riqueza pessoal que lhe permitiria a contratação de serviços a outros holons.
- conforme foi referido anteriormente, neste trabalho apenas foram abordadas as holarquias estáticas da arquitectura. Um ponto de acção será certamente a exploração de holarquias dinâmicas e um estudo concreto das suas vantagens no funcionamento do sistema. De um ponto de vista teórico o conceito é extremamente interessante, sendo talvez necessário fundamenta-lo um pouco mais através da experimentação. Nesse sentido, será necessário definir o protocolo de formação de holarquias, especificando concretamente o mecanismo de holarquias dinâmicas (formação, mensagens trocadas, controlo, cooperação, adesão, remoção e término).
- a entrada de uma tarefa prioritária no sistema (*e.g.*, encomenda urgente de um grande cliente, ou encomenda importante devido ao seu valor) pode levantar algumas questões normalmente resolvidas recorrendo ao conhecimento tácito que o Director de Produção possui sobre como resolver essas situações (envolvendo o “sacrifício” de uma ou outra tarefa menos importante para dar lugar à tarefa prioritária, ou então, recorrendo a horas extras). Na melhor das hipóteses, o escalonamento da nova tarefa não acarreta

problemas se houver capacidade livre para escalonar essa tarefa. No entanto, essa é uma situação que raramente acontece na prática, indo a nova tarefa sobrepor-se a tarefas já escalonadas (Figura 7.5a). Nesta situação é necessária uma renegociação entre o novo Holon de Tarefa e os holons das tarefas já escalonadas, em que a tarefa prioritária terá que persuadir (ou mandar) os outros holons a libertarem o tempo de recurso que lhes foi atribuído (Figura 7.5b).

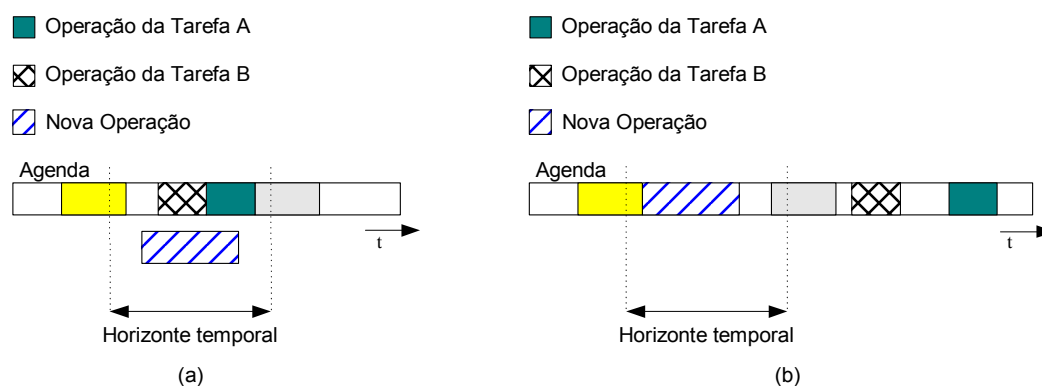


Figura 7.5 – Reescalamento para operação prioritária: (a) pedido; (b) re-arranjo

Mais uma vez, nesta situação, a utilização de raciocínio difuso, bem como a modelação de certas características mais antropomórficas nos holons (*e.g.*, egoísmo/altruísmo, capitalista/assalariado, chefe/empregado) poderá ser útil. Adicionalmente, considerando a Economia anteriormente referida, existem custos dos recursos que vão ver a agenda modificada e das tarefas que vão ceder tempo, tendo a nova tarefa que pagar a estes holons. Um factor importante a ter em conta é evitar o “efeito dominó” no reescalamento, ou seja, evitar que a mudança de uma tarefa implique mudanças em todas as tarefas. Existe uma certa sensibilidade de que os algoritmos genéticos [Holland, 1975] poderão ser úteis na minimização de alterações no escalonamento, tentando encontrar uma solução com o menor número possível de alterações.

- uma outra excepção que pode ocorrer é a alteração dinâmica de parâmetros da tarefa, nomeadamente, aumentar ou diminuir a quantidade a fabricar, atrasar ou adiantar a data de entrega. As situações de diminuir a quantidade a fabricar ou atrasar a data de entrega não acarretam grandes consequências, pois no primeiro caso, libertam tempo de recurso que pode vir a ser usado noutra tarefa e no segundo permitem uma maior folga em relação ao intervalo escalonado. O mesmo já não se pode dizer do aumento da quantidade ou do adiantamento da data de entrega, pois o escalonamento previamente efectuado pode tornar-se inviável. Nessa situação, uma negociação Tarefa a Tarefa semelhante à de Tarefas prioritárias é necessária para reescalonar a tarefa.

- a utilização de um “quadro negro” como único meio de comunicação coloca um gargalo de eficiência no sistema com o aumento do número de holons. Pensa-se que tal problema poderá ser ultrapassado recorrendo à existência de “quadros negros” distribuídos (um por cada holarquia) e canais de comunicação clássicos (*e.g.*, *sockets*) em cada holon. O uso do “quadro negro” para cada holarquia permite diminuir o número de conexões necessárias entre todos os membros da holarquia, funcionando ao mesmo tempo como área de memória partilhada que facilita a partilha de conhecimento.
- a ligação Visual Basic/SICStus PROLOG coloca também algumas limitações ao protótipo, pois introduz uma latência considerável no processamento de mensagens. Tal problema poderá ser resolvida considerando outras ferramentas para a componente de comunicações que permita um melhor desempenho da aplicação.
- uma outra limitação do protótipo centra-se na não consideração de transportes (disponibilidade momentânea e duração), bem como na modelação real dos *buffers* (dimensão e disponibilidade momentânea), da existência de ferramentas e de tempos de *setups*. Por forma a aproximar o protótipo de um sistema mais real e menos experimental, é necessário considerar estes aspectos. A existência de transportes, ferramentas e a capacidade momentânea dos *buffers* estão directamente relacionados com a modelação do carácter temporal no sistema, sendo, por isso, necessário trabalhar esse ponto em primeiro lugar.
- o sistema apresentado não tem em consideração a “experiência” anterior; *i.e.*, o sistema não aprende com vista a melhorar o seu desempenho. A *Aprendizagem Automática* poderá ser utilizada, por exemplo, nos Holons de Tarefa, criando uma memória colectiva com indicação da “credibilidade” dos recursos. Dessa forma, um Holon de Tarefa poderá decidir entre dois ou mais recursos com base não só nos intervalos e custos propostos, mas também no comportamento anterior desses recursos (*e.g.*, atraso na execução das operações, qualidade dos produtos fabricados).
- um desenvolvimento futuro refere-se à integração de três vertentes: produção, empresa virtual e comércio electrónico<sup>23</sup>. Assim, o presente trabalho contribui com a componente de produção, que poderá ser distribuída e agrupada a um nível mais alto através da componente de empresas virtuais (formação e operação), sendo as relações de compras e vendas processadas automática e electronicamente pelo componente de comércio electrónico (*business-to-business* e *business-to-consumer*).

Conforme se pode constatar pela extensão desta secção há ainda imenso trabalho a fazer. Além das limitações, foram também apresentadas perspectivas e sugestões de novos caminhos a percorrer, alguns dos quais têm dimensão e abrangência para novos trabalhos de Doutoramento ou Mestrado, permitindo assim que este trabalho floresça, dando origem a um sistema integrado cada vez mais completo e útil para a sociedade ■

---

<sup>23</sup> Esta proposta de investigação foi aceite pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, no projecto “*IMaGE – Integrated Tools for Computer Supported Manufacturing*” iniciado em Outubro de 2000.