

Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa

Uma ONTOLOGIA para um MODELO de ESCALONAMENTO da PRODUÇÃO/DISTRIBUIÇÃO

Relatório Interno ISCTE-DCTI-1998-003
Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação do I.S.C.T.E.

Versão resumida deste texto apresentada na conferência IBERAMIA'98:

Reis, J.; Mamede, N.; O'Neill, H., 1998, *Ontologia para um Modelo de Planeamento e Controlo na Empresa Estendida*, in Progress in Artificial Intelligence, Proceedings of the 6th Iberoamerican Conference, IBERAMIA'98, Outubro de 1998, Lisboa, Portugal, 43-54, Helder Coelho (ed.), Edições Colibri, Lisboa.

Joaquim Reis

ISCTE - Instituto Superior de Ciências
do Trabalho e da Empresa
Dep. Ciências e Tecnologias da
Informação
Avenida das Forças Armadas,
1600 Lisboa, Portugal
Joaquim.Reis@iscte.pt

Nuno Mamede

IST - Instituto Superior Técnico
Dep. de Engenharia Informática
Avenida Rovisco Pais,
1049-001 Lisboa, Portugal
Nuno.Mamede@acm.org

Janeiro de 1998

Resumo

No contexto do desenvolvimento de um modelo para resolução de problemas de Planeamento e Escalonamento Multi-Agente num ambiente de Empresa Estendida distinguem-se dois níveis de modelação: (1) o nível físico (rede de produção/distribuição), (2) o nível virtual (agentes e troca de informação para coordenação). Este texto aborda o nível físico (1) e nele se define um conjunto de objectos básicos, bem como as relações entre eles, que servirá de suporte conceptual à modelação computacional de redes de produção/distribuição.

Convenções Tipográficas

- (i) De um modo geral usam-se caracteres especiais de uma fonte “Courier” em expressões ou fórmulas que se destacam assim do texto normal. Objectos simples são denotados por variáveis compostas por letras deste tipo de fonte. Exemplos: A, a, W, w, p, r, t, q .
- (ii) Objectos compostos (tuplos ou conjuntos) são denotados por variáveis compostas por letras de um tipo de fonte “Colonna MT”. Exemplos: $I, U, pq, E, O, P, V, pq, E, O, a, w, r$.
- (iii) Tuplos (pares ordenados, triplos ordenados, etc.) são denotados por variáveis compostas por letras de um tipo de fonte “Colonna MT” em texto regular. Exemplos: $I, U, pq, F, E, O, a, w, r$.
- (iv) Conjuntos são denotados por variáveis compostas por letras de um tipo de fonte “Colonna MT” em texto “itálico”. Exemplos: $P, V, pq, F, E, O, a, w, r$. O número de elementos de um conjunto c é denotado por $|c|$ (cardinal de c).
- (v) Usam-se os símbolos de menor e maior ($<$ e $>$) para delimitar os elementos de um tuplo e vírgulas ($,$) para separar esses elementos. Exemplos: $\langle I, U \rangle, \langle v, TN, p, m, b \rangle, \langle p, q \rangle$.
- (vi) Usam-se chavetas ($\{$ e $\}$) para delimitar os elementos de um conjunto e vírgulas ($,$) para separar esses elementos. Exemplos: $\{p_1, \dots, p_i\}, \{v_1, \dots, v_i\}, \{r_1, \dots, r_i\}, \{a_1, \dots, a_i\}$.
- (vii) Objectos a que é associado um valor variável no tempo são denotados por uma variável seguida de um símbolo denotando tempo (geralmente t) delimitado por parêntesis. Exemplos: $C(t), c(t), c(t)$.
- (viii) Usam-se sub-índices para denotar objectos diferentes da mesma natureza, ou do mesmo grupo. Quando existe mais de um índice (variáveis com dois índices denotam objectos que relacionam um par de dois outros objectos, os indicados pelo par de índices) eles são separados por vírgulas ($,$). Exemplos: $b_{i,j}, E_{x,y}$.
- (ix) Usam-se super-índices para denotar objectos diferentes da mesma natureza que são componentes de objectos compostos diferentes, referindo-se o super-índice ao objecto composto de que o objecto é componente (sub-índices e super-índices poderão, naturalmente, coexistir na mesma variável). Exemplos: $r^x, p^x, r_i^x, pq_e^x, P_s^x$.
- (x) Os índices especiais e, s e \max denotam valores particulares (à entrada, à saída e valor máximo, respectivamente) de certos objectos. Exemplos: $t_e, t_s, p_{e,i}, p_{s,i}, P_{e,i}^x, W_{\max}(t), A_{\max}^x(t)$.

Lista de Símbolos

Dimensões

\mathcal{P}	Conjunto universal de produtos
\mathcal{P}	Identifica um produto (elemento de \mathcal{P})
\mathcal{P}_i	O produto i (um elemento de \mathcal{P})
\mathcal{Q}	Conjunto dos valores possíveis de quantidades. É igual ao conjunto dos números reais \mathcal{R} .
q, q_i	quantidade
\mathcal{T}	Conjunto dos valores possíveis de instantes de tempo. É igual ao conjunto dos números reais \mathcal{R} ou a um subconjunto de \mathcal{R} (por exemplo, o conjunto dos números inteiros).
t, t_i	Instante de tempo
t_s	Instante de início, ou de entrada, de uma tarefa
t_s^x	Instante de início, ou de entrada, da tarefa \mathcal{O}_x
t_e	Instante de fim, ou de saída, de uma tarefa
t_e^x	Instante de fim, ou de saída, da tarefa \mathcal{O}_x
\mathcal{V}	Conjunto universal de nós, ou locais
v	Nó, ou local (elemento de \mathcal{V})
v_x	O nó, ou local, x (um elemento de \mathcal{V})

Eventos

e, e_i	Evento
e_s	Evento de início, ou de entrada, de uma tarefa
e_s^x	Evento de início, ou de entrada, da tarefa \mathcal{O}_x
e_e	Evento de fim, ou de saída, de uma tarefa
e_e^x	Evento de fim, ou de saída, da tarefa \mathcal{O}_x
pq	Conjunto de pares produto-quantidade associado a um evento
pq_s	Conjunto de pares produto-quantidade associado a um evento de início de uma tarefa
pq_e	Conjunto de pares produto-quantidade associado a um evento de fim de uma tarefa
pq_s^x	Conjunto de pares produto-quantidade associado ao evento de início da tarefa \mathcal{O}_x
pq_e^x	Conjunto de pares produto-quantidade associado ao evento de fim da tarefa \mathcal{O}_x
pq, pq_i	Par produto-quantidade de um evento

PQ_s	Um par produto-quantidade de um evento de início de uma tarefa
PQ_e	O par produto-quantidade de um evento de fim de uma tarefa
PQ_s^x	Um par produto-quantidade associado ao evento de início da tarefa O_x
PQ_e^x	O par produto-quantidade associado ao evento de fim da tarefa O_x
Tarefas, Fluxos, Planos	
O	Conjunto de tarefas
O	Tarefa (elemento de O)
O_x	A tarefa x (elemento de O)
O_i^x	A subtarefa i da tarefa x
TN	Designa o tipo de tarefa ou o tipo de nó (pode ser S, P, T ou P/T)
S	Designa o tipo de tarefa acumulação ou o tipo de nó acumulador
P	Designa o tipo de tarefa produção ou o tipo de nó produtor (processador produtor)
T	Designa o tipo de tarefa transporte ou o tipo de nó transportador (processador transportador)
F	Conjunto de fluxos
F, F_i	Fluxo (elemento de F)
$F_{x,y}$	O fluxo (elemento de F) entre as tarefas fornecedora, O_x e cliente, O_y (elementos de O)
Capacidades	
C	Designação genérica de capacidade (pode ser A ou W)
$C(t)$	Designação genérica de capacidade disponível no instante t
$C_{max}(t)$	Designação genérica de capacidade máxima no instante t
$c(t)$	Designação genérica do conjunto das quantidades de capacidade utilizadas no instante t em cada produto disponibilizável de um nó
$c_i(t)$	Designação genérica de capacidade utilizada no produto disponibilizável p_i (elemento de P) no instante t em um nó ($c_i(t)$ é um elemento de $c(t)$)
A	Capacidade de acumulação
$A(t)$	Capacidade de acumulação disponível no instante t
$A^x(t)$	Capacidade de acumulação disponível no instante t no nó v_x
$A_{max}(t)$	Capacidade máxima de acumulação no instante t
$A_{max}^x(t)$	Capacidade máxima de acumulação no instante t no nó v_x
$a(t)$	Conjunto das quantidades de capacidade de acumulação utilizadas no instante t em cada produto disponibilizável de um nó
$a^x(t)$	Conjunto das quantidades de capacidade de acumulação utilizadas no

instante t em cada produto disponibilizável do nó acumulador v_x

$a_i(t)$	Quantidade de capacidade de acumulação utilizada no produto disponibilizável p_i (elemento de \mathcal{P}) no instante t ($a_i(t)$ é um elemento de $a(t)$)
$a_i^x(t)$	Quantidade de capacidade de acumulação utilizada no produto disponibilizável p_i (elemento de \mathcal{P}) no instante t no nó v_x ($a_i^x(t)$ é um elemento de $a^x(t)$)
W	Capacidade de processamento
$W(t)$	Capacidade de processamento disponível no instante t
$W^x(t)$	Capacidade de processamento disponível no instante t no nó v_x
$W_{\max}(t)$	Capacidade máxima de processamento no instante t
$W_{\max}^x(t)$	Capacidade máxima de processamento no instante t no nó v_x
$w(t)$	Conjunto das quantidades de capacidade de processamento utilizadas no instante t em cada produto disponibilizável de um nó
$w^x(t)$	Conjunto das quantidades de capacidade de processamento utilizadas no instante t em cada produto disponibilizável do nó processador v_x
$w_i(t)$	Quantidade de capacidade de processamento utilizada no produto disponibilizável p_i (elemento de \mathcal{P}) no instante t ($w_i(t)$ é um elemento de $w(t)$)
$w_i^x(t)$	Quantidade de capacidade de processamento utilizada no produto disponibilizável p_i (elemento de \mathcal{P}) no instante t no nó v_x ($w_i^x(t)$ é um elemento de $w^x(t)$)

Nós, Arcos, Redes

I	Interface de um nó
I^x	Interface do nó v_x
U	Núcleo de um nó
U^x	Núcleo do nó v_x
TN	Designa o tipo de nó ou o tipo de tarefa (pode ser S, P, T ou P/T)
S	Designa o tipo de nó acumulador ou o tipo de tarefa acumulação
P	Designa o tipo de nó produtor (processador produtor) ou o tipo de tarefa produção
T	Designa o tipo de nó transportador (processador transportador) ou o tipo de tarefa transporte
\mathcal{P}	Conjunto de produtos de saída de um nó (elementos de \mathcal{P})
m	Conjunto de produtos de entrada de um nó (elementos de \mathcal{P})
\mathcal{P}^x	Conjunto de produtos de saída do nó v_x (elementos de \mathcal{P})

m^x	Conjunto de produtos de entrada do nó v_x (elementos de p)
p_e	Produto de entrada de um nó (elemento de m) ou de uma tarefa
$p_{e,i}$	O produto de entrada i de um nó (um elemento de m) ou de uma tarefa
p_e^x	Produto de entrada do nó v_x (elemento de m^x) ou da tarefa O_x
$p_{e,i}^x$	O produto de entrada i do nó v_x (um elemento de m^x) ou da tarefa O_x
p_s	Produto de saída de um nó (elemento de p) ou de uma tarefa
$p_{s,i}$	O produto de saída i de um nó (um elemento de p) ou de uma tarefa
p_s^x	Produto de saída do nó v_x (elemento de p^x) ou da tarefa O_x
$p_{s,i}^x$	O produto de saída i do nó v_x (um elemento de p^x) ou da tarefa O_x
b	Conjunto de quantidades da lista de materiais de um nó
b^x	Conjunto de quantidades da lista de materiais do nó v_x
$b_{i,j}$	Quantidade necessária do produto consumível p_i para disponibilizar 1 unidade de produto p_j de um nó ($b_{i,j}$ é um elemento de b)
$b_{i,j}^x$	Quantidade necessária do produto consumível p_i para disponibilizar 1 unidade de produto p_j do nó v_x ($b_{i,j}^x$ é um elemento de b^x)
r	Conjunto de factores de conversão de capacidade para a quantidade de capacidade utilizada para cada produto disponibilizável de um nó
r^x	Conjunto de factores de conversão de capacidade para a quantidade de capacidade utilizada para cada produto disponibilizável do nó v_x
r_i	Factor de conversão de capacidade para o produto p_i (disponibilizável) de um nó: número de unidades de capacidade do nó consumidos por cada unidade de produto p_i
r_i^x	Factor de conversão de capacidade para o produto p_i (disponibilizável) no nó v_x : número de unidades de capacidade do nó v_x consumidos por cada unidade de produto p_i
E	Conjunto de arcos
E, E_i	Arco (elemento de E)
$E_{x,y}$	O arco (elemento de E) entre os nós fornecedor, v_x e cliente, v_y)
d	Conjunto de produtos associados a um arco

Índice de Matérias

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O Problema	2
1.2 Trabalho Anterior	4
1.3 Relevância da Ontologia	6
2 ONTOLOGIA	6
2.1 Dimensão	7
2.2 Evento	9
2.3 Capacidade	9
2.3.1 Gestão da Capacidade	11
2.3.2 Perfil de Capacidade	12
2.3.3 Afectação de Capacidade	13
2.3.4 Reserva de Capacidade	14
2.4 Nó	15
2.5 Arco	18
2.6 Rede	19
2.7 Tarefa	20
2.7.1 Detalhe de Tarefas	21
2.8 Fluxo	24
2.9 Plano	25
2.9.1 Restrições de Continuidade	26
2.9.2 Restrições Temporais	29
2.9.3 Restrições de Capacidade	30
3 CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO	30
4 REFERÊNCIAS	32

1 Introdução

Neste texto descrevem-se os objectos básicos necessários para a construção de um modelo computacional do Planeamento e Controlo da Produção e Distribuição, isto é, propõe-se uma ontologia (ver [Rich 1991],¹ [Russell 1995]², [Gruber 1993a] ou [Gruber 1993b]) para este domínio. O objectivo é poder dispor de um vocabulário base do planeamento e controlo de operações de produção/distribuição, que será ponto de partida para trabalho futuro.

Numa rede de produção/distribuição existe um conjunto de empresas de uma cadeia de fornecimento (*supply chain*) ligadas por relações fornecedor-cliente, que desempenham actividades de produção e distribuição — actuando como fornecedores, produtores, distribuidores, retalhistas — e cooperam na colocação de um produto ou produtos finais no mercado. Os nós da rede correspondem a pequenas e médias empresas especializadas, que podem desempenhar um ou vários tipos de tarefas, fases ou estágios (de produção, de armazenamento, de transporte) bem definidas no processo de produção/distribuição. Esta rede é uma *rede de produção/distribuição cooperativa*, isto é, os nós *cooperam, em pé de igualdade*, procurando conjugar objectivos individuais dos nós/empresas com objectivos globais da rede (vários trabalhos têm tornado evidente a importância desta cooperação e da necessidade de coordenação — ver, por exemplo, [Forrester 1958], [Scott 1991], [Lee 1992], [Lee 1993], [Fox 1993], [O'Neill 1996], [Thomas 1996], [Parnell 1996]).

Na Figura 1 representa-se o *pipeline* logístico, ou cadeia de fornecimento, em que coexistem várias destas redes de produção/distribuição (representadas por setas). Uma rede de produção/distribuição é, assim, uma espécie de *empresa distribuída*, ou *empresa estendida*, já que é composta por empresas autónomas. Os objectivos podem ser genericamente traduzidos pela máxima da logística: *colocar o produto certo na quantidade certa, no momento certo, no local certo* (ver, por exemplo, em [Christopher 1993], [Carvalho 1996] ou [Gattorna 1996]) isto é, a satisfação de pedidos (de procura ou de encomendas) de produtos. Isto traduz o objectivo global, para os nós junto do cliente final que disponibilizam produtos finais, mas é também um objectivo de cada um dos nós da rede, incluindo os que disponibilizam produtos em estágios intermédios.

O enquadramento que se pretende aqui sugerir corresponde a um paradigma que é o da *Empresa Estendida* (ver [Sackett 1994], [O'Neill 1994], [O'Neill 1996] ou [Browne 1996]). A Empresa Estendida (EE) é uma fusão configurável e transiente dos *processos de negócio* de diferentes *unidades de negócio* para formar um sistema que coloca num mercado um determinado produto. Por exemplo, na Figura 1, as setas a cheio poderiam ser redes de Empresa Estendida. Este sistema forma uma rede de produção/distribuição cujos nós são unidades de negócio das empresas, cada uma especializada em determinadas funções, com interfaces compatíveis e processamento transaccional estruturado para as outras empresas. O conceito de EE é tipicamente realizável num domínio que é o das unidades de negócio de produção ou serviços, capazes de operar como grupos num sistema controlado e planeado para colocação de produtos ou serviços num mercado, eventualmente distribuídas do ponto de vista geográfico.

¹Página 292.

²Páginas 217 a 222.

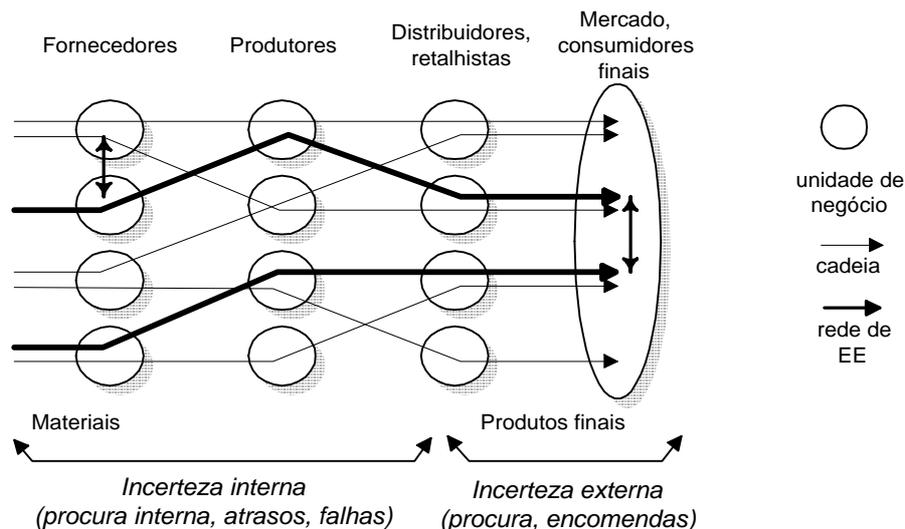


Figura 1- Cadeia de fornecimento.

Segundo [O'Neill 1996], para ter sucesso uma empresa deve reduzir *tempos de resposta* para além de aumentar a *qualidade* e a *flexibilidade* nos seus produtos e serviços, mas para isso deve estar *ligada a todos os estágios do processo de negócio* em que está envolvida, não apenas dentro das suas próprias fronteiras mas na cadeia de fornecimento da indústria (esta ligação é considerada a motivação fundamental para o agrupamento das empresas em redes de EE). Não só a produção e distribuição de produtos são considerados importantes, mas também o desenvolvimento (cooperativo) de novos produtos. Segundo o modelo da EE a coordenação das operações da rede de EE, numa perspectiva global (*i.e.*, abrangendo toda a rede) deve ser assegurada por uma *unidade de supervisão*, para a qual contribuem todos os nós intervenientes na rede.³ Esta unidade de supervisão funciona como se fosse uma espécie de *nó virtual*, ou agente coordenador, de rede que integra perspectivas individuais (dos nós) numa perspectiva global da rede. Pressupõe-se ainda uma infraestrutura que possibilita comunicações rápidas e a partilha de dados comuns (rede de comunicações, base de dados) necessários à coordenação.

O presente trabalho e o trabalho futuro dizem respeito ao *planeamento e escalonamento das tarefas de produção/distribuição*, envolvendo *múltiplos produtos e múltiplos agentes* de uma rede de EE. Os agentes gerem os *nós* de uma rede de produção/distribuição que são os recursos disponíveis para a realização das tarefas logísticas de produção/distribuição. Na ontologia são descritos os elementos básicos de suporte de modelação computacional necessários para o trabalho futuro: estabelecem-se os objectos básicos necessários para construir modelos de redes de produção/distribuição (incluindo os recursos e as capacidades disponibilizadas, planos/tarefas em redes, etc.) para a representação e tratamento computacional do problema do planeamento/escalonamento distribuído, acima referido, e a seguir descrito.

1.1 O Problema

No ambiente de produção/distribuição existem recursos (fábricas, armazéns, transportadoras), que são os nós de numa rede de produção/distribuição de um conjunto de produtos, e agentes

³A unidade de supervisão é uma equipa onde cada empresa envolvida está representada.

que actuam como gestores, tomando decisões de planeamento/escalonamento de tarefas que afectam a capacidade disponível dos nós.

A actividade de escalonamento das tarefas logísticas na rede de produção/distribuição é vista na perspectiva do paradigma Multi-Agente da Inteligência Artificial Distribuída (ver, por exemplo, [Bond 1988], [Coelho 1995], or [ICMAS 1996]), como um problema de *coordenação multi-agente*. Os agentes cooperam para respeitar restrições (capacidades limitadas dos nós/recursos da rede, precedências das tarefas atribuídas a cada nó) e competem para satisfazer preferências individuais (poderia conceber-se a existência de várias funções objectivo, cada uma exprimindo as preferências de cada agente). Trata-se de um tipo de ambiente *semi-cooperativo*, onde o problema a resolver é um problema de cooperação *parcialmente adversarial/parcialmente cooperativo*, segundo as ideias em [Yokoo 1991] e [Yokoo 1990].

Para além da rede, dita *física*, de produção/distribuição, que inclui os nós (as unidades de negócio da EE) e as relações fornecedor-cliente entre eles, numa EE existe uma rede *virtual* composta pelos agentes e uma rede de comunicações, através da qual os agentes comunicam. Cada nó é gerido por um agente e cada agente gere um ou mais nós. As relações fornecedor-cliente entre os nós estendem-se aos agentes. Eles agentes são os actores do ambiente e tomam decisões de planeamento/escalonamento de tarefas que não-de resultar na execução destas. Na rede virtual, os agentes comunicam entre si pedidos de planeamento e escalonamento de tarefas. As tarefas pedidas a cada agente devem ser levadas a cabo pelos nós por ele geridos, com o objectivo de disponibilizar produtos aos seus agentes clientes, ou ao exterior da rede.

Na actividade de planeamento e escalonamento a coordenação entre agentes é conseguida através da comunicação entre pares de agentes fornecedor-cliente. Cada agente interage com outros agentes — fornecedores e clientes — enviando e recebendo *mensagens*. Estas mensagens contêm futuros escalonamentos de tarefas possíveis, isto é, planos (considera-se que um *plano* é uma colecção de tarefas parcial ou completamente definidas e que um *escalonamento* é um plano com tarefas completamente definidas). Através desta forma de comunicação, um par de agentes fornecedor-cliente pode: i) envolver-se num trajecto de conversação respeitante à satisfação de um pedido de um produto; ii) negociar um plano para uma tarefa a ser executada por um dos agentes; iii) chegar a um acordo com um escalonamento para a tarefa; e iv) eventualmente, chegar a acordo para recalendarização da tarefa; ou v) cancelar a tarefa.

O problema em questão é aqui designado por problema de Planeamento e Escalonamento de Tarefas em rede de produção/distribuição. Ele corresponde ao problema de escalonamento *em sentido lato*⁴ como descrito em [Morton 1993] envolvendo o planeamento de médio e curto prazo.⁵ O problema é caracterizado pelos seguintes aspectos (para além dos já descritos):

- **Planeamento** - Determinação das *tarefas* a executar pela rede e das respectivas *quantidades* de produtos (intermédios e finais) a produzir, armazenar e transportar pelos nós da rede dentro de um *horizonte temporal* determinado e em função de *pedidos* (procura, encomendas) à rede;

⁴ *I.e.*, o escalonamento não é entendido aqui como sendo a afectação de recursos elementares (máquinas individuais) a operações elementares, como é entendido no escalonamento clássico (ver, por exemplo [Kan 1976]).

⁵ O que, segundo [Morton 1993], abrange desde a logística ao estabelecimento de datas limite de encomendas.

- **Escalonamento** ou programação⁶ - Determinação de *tempos* (de início e fim) das tarefas e a *afecção de capacidades* dos nós às tarefas;
- **Objectivos** - Determinação de escalonamentos de tarefas que sejam soluções, senão óptimas, pelo menos satisfatórias, relativamente a critérios.⁷ Numa rede de produção distribuição cada nó da rede tem um objectivo que será, em geral, diferente dos outros nós. Numa rede de EE, para além desse facto existem objectivos globais e os nós tentam conjugar os seus objectivos com o objectivo global;
- **Restrições** - Nem todos os escalonamentos de tarefas possíveis são realizáveis pois existem *restrições* que lhes são impostas. Existem restrições de capacidade (limites à capacidade de produção, armazenamento e transporte) e restrições temporais (precedências das tarefas, datas de entrega) que são rígidas, isto é, devem ser respeitadas por qualquer solução. Existem preferências,⁸ isto é, restrições mais ou menos violáveis em soluções consideradas menos, ou mais, satisfatórias (e tanto mais satisfatórias quanto menos restrições forem violadas).⁹

1.2 Trabalho Anterior

A investigação em planeamento coordenado existe nas áreas da Ciência da Gestão e Investigação Operacional desde os anos sessenta. De acordo com [Thomas 1996], iniciou-se com o trabalho de Clark e Scarf [Clark 1960], em que os fluxos de produtos são vistos como quantidades discretas (lotes) a transferir entre estágios de um sistema de armazenamento/distribuição multi-escalão, ou multi-estágio.¹⁰ Desde então, muitos investigadores estudaram sistemas de armazenamento/distribuição e sistemas de produção/distribuição multi-escalão, muito embora o tema da coordenação no escalonamento da produção/distribuição tenha tido menor atenção.

A maior parte destes estudos, desenvolvem-se, de alguma forma, a partir da ideia da Quantidade Económica de Encomenda. Oferecem modelos matemáticos do problema do dimensionamento de lote (económico) na sua versão multi-escalão e vêem o problema como um problema de optimização. O valor da função objectivo, que é usualmente a soma dos custos de posse e de preparação/encomenda de todos os nós da rede, deve ser minimizado para determinar a dimensão dos lotes (económicos) a serem transferidos entre cada par de nós da rede. Estes modelos são mais úteis numa abordagem partindo de um ponto de vista estratégico/táctico, mas não tão úteis para um horizonte temporal de curta duração como é o do escalonamento das actividades. Entre as suas limitações típicas incluem-se (ver [Muckstadt 1993], or [Williams 1981], por exemplo): i) a produção é considerada instantânea e os tempos de ciclo são zero, ii) a procura do produto final é constante no tempo, iii) é suposto a rede

⁶ *Scheduling*, na literatura.

⁷ Por exemplo, escalonamentos de tarefas com um tempos de ciclo mais curtos, ou que minimizem stocks.

⁸ Ou restrições flexíveis.

⁹ O termo *constraints* (restrições, ou constrangimentos) é usado na literatura anglo-saxónica para designar restrições rígidas, por oposição a *preferences* (preferências) que designa restrições flexíveis; no entanto, os termos *hard constraints* são frequentemente também usados para referir as restrições rígidas quando se pretende reforçar o carácter não violável deste tipo de restrições.

¹⁰ Contudo, um pouco antes, Forrester [Forrester 1958] teve uma abordagem diferente ao estudar as oscilações de fluxos de produtos causadas por oscilações na procura final em modelos de redes de produção/distribuição, vistos como sistemas dinâmicos.

poder seguir políticas pré-especificadas como um todo,¹¹ iv) a rede está dedicada apenas a um produto final, v) eventos inesperados não são acomodados,¹² vi) a rede é considerada um sistema centralizado, havendo apenas uma única função objectivo,¹³ vii) é procurada uma solução óptima global,¹⁴ ¹⁵ viii) não se consideram preferências de cada nó individual por soluções óptimas globais.

Métodos modernos para o escalonamento incluem técnicas como Satisfação de Restrições (*Constraint Satisfaction*) [Kumar 1992], [Prosser 1991] e conceitos como Procura Heurística com Restrições (*Constrained Heuristic Search*) [Fox 1989], [Sycara 1991] e Escalonamento Micro-Oportunístico (*Micro-Opportunistic Scheduling*) [Sadeh 1994]. Com estes métodos, encontrar uma solução para o problema envolve uma combinação técnicas de procura com retrocesso e de satisfação de restrições, usando heurísticas específicas. Estas técnicas e conceitos contribuíram para a construção de sistemas de escalonamento grandes e complexos (ver, por exemplo [Atabakhsh 1991], ou [Zweben 1994a]).

Hoje, a globalização dos mercados e as pressões competitivas põem às empresas desafios que as forçam a cooperar na cadeia de fornecimento, com curtos tempos de resposta às solicitações do cliente e para permanecerem competitivas devem reduzir custos de operação e ao mesmo tempo melhorar o serviço ao cliente [Thomas 1996].

Como resultado evolui-se no sentido de um desenho e um controlo mais coordenados dos actores da cadeia de fornecimento. Também, como os recentes avanços da tecnologia nas comunicações e na informática, as empresas têm oportunidade de reduzir custos através de coordenação do planeamento e do escalonamento dos vários estágios da cadeia. Conceitos como Resposta Rápida (*Quick Response*), Resposta Precisa (*Accurate Response*), Gestão Integrada da Cadeia de Fornecimento (*Integrated Supply Chain Management*), Escalonamento Ágil (*Agile Scheduling*), Empresa Virtual ou Empresa Estendida (*Virtual Enterprise, Extended Enterprise*) — ver, por exemplo, [Ross 1996], [Fisher 1994], [Fox 1993], [Rabelo 1996] and [O'Neill 1996], respectivamente — estão sendo usados para descrever modelos de redes cooperativas na cadeia de fornecimento.

Por exemplo, no paradigma da Empresa Estendida (EE) [O'Neill 1996], [Sackett 1994], um grupo de empresas especializadas e interdependentes cooperam para colocar no mercado, nos momentos certos, as quantidades procuradas de produtos finais. Neste cenário, todo o processo de negócio de um produto é realizado por uma rede de *unidades de negócio*, geograficamente distribuídas, geridas pelas empresas. Estas estão ligadas por uma rede electrónica de comunicações que dá suporte à troca de informação necessária à coordenação. A *unidade de supervisão* assume um papel de integração entre unidades de negócio e é

¹¹ Como políticas estacionárias (cada nó entrega um lote de dimensão fixa) e políticas imbricadas (a dimensão do lote entregue por cada nó é um múltiplo inteiro da dimensão do lote entregue pelo seu nó sucessor na rede).

¹² Quer dizer, se a procura se altera, ou os nós falham nas entregas previstas, o problema teria de ser reformulado e a solução recalculada do início.

¹³ É assumido que todos os nós têm o mesmo, e único, objectivo. É assumido que toda a informação (por exemplo, sobre os custos) é sempre conhecida.

¹⁴ Uma solução óptima é sempre benvinda se puder ser determinada *a tempo*, mas os métodos matemáticos que buscam soluções óptimas consomem tempo. Quando o tempo escasseia, preferem-se métodos que podem obter rapidamente boas soluções, em vez de assegurar soluções óptimas. Para além disso, num sistema em que estão envolvidos vários agentes, em que os agentes têm objectivos diversos, não poderemos provavelmente falar de uma solução óptima *global*.

¹⁵ Existem, no entanto, excepções. Por exemplo, o sistema LOGJAM, referido em [Morton 1993] usa heurísticas (*bottleneck dynamics*) para escalonamento de tarefas logísticas.

básicamente uma equipa, em que estão representadas as unidades de negócio, com alguma autoridade para definir políticas globais de planeamento de médio/longo prazo.

O paradigma da EE tenta dar resposta aos desafios colocados às empresas. Para o presente trabalho, este paradigma contribuiu em parte, tanto do ponto de vista de suporte conceptual, como com a experiência da sua aplicação prática, nomeadamente num caso prático de uma cadeia de empresas na área dos têxteis e vestuário, no contexto do projecto Esprit AITEAR [AITEAR 1997a], [AITEAR 1997b].

1.3 Relevância da Ontologia

Num ambiente multi-agente de uma rede de EE agentes operam e comunicam através de mensagens conteúdo frases numa representação formal de conhecimento. Agentes põem questões e dão respostas, negociam, trocam conhecimento.

Segundo [Gruber 1993b], para uma comunicação ao nível do conhecimento como esta são necessárias convenções a 3 níveis:

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Formato da linguagem de representação• Protocolo de comunicação entre agentes | } | independentes do conteúdo do conhecimento comunicado/trocado |
| <ul style="list-style-type: none">• Especificação do conteúdo do conhecimento partilhado | } | ontologia como uma especificação para estabelecer acordo sobre o conhecimento (assumpções partilhadas e modelos do mundo). |

Uma *ontologia* é uma especificação explícita de uma *conceptualização* (objectos, conceitos, relações entre eles, que se assumem existir numa qualquer área de interesse) que define o conjunto de termos representacionais, ou o vocabulário, com o qual questões e asserções são trocadas entre agentes. As ontologias são usadas para descrever *compromissos ontológicos* para um conjunto de agentes para que eles possam comunicar acerca de um domínio de discurso sem operarem necessariamente sobre numa teoria globalmente partilhada. Estes compromissos ontológicos são acordos para usar o vocabulário partilhado de uma forma coerente e consistente (embora possivelmente não completa: os agentes não partilham necessariamente bases de conhecimento, cada um sabe coisas que outros não sabem e não exigível que um agente saiba responder a todas as questões que podem ser formuladas no vocabulário comum) [Gruber 1993b].

O objectivo da definição da ontologia, no presente trabalho, é estabelecer o conjunto de objectos básicos do domínio das redes de produção/distribuição relevantes para a actividade de planeamento e escalonamento multi-agente na EE, o qual constitui o domínio de discurso das mensagens trocadas entre os agentes da rede virtual.

2 Ontologia

Numa rede de EE de produção/distribuição existem dois tipos de objectos:

- **Objectos físicos** - A *rede física* de produção/distribuição, ou componente física da EE é uma *estrutura de recursos físicos* fixa,¹⁶ recursos estes que estão disponíveis para tarefas de produção/distribuição — nós da rede com as relações de fornecedor-cliente entre eles — e um conjunto de *planos* que evolui ao longo do tempo envolvendo tarefas e fluxos físicos de materiais/produtos que são trocados entre os nós.
- **Objectos virtuais** - A *rede virtual* é constituída por *agentes* e *fluxos de informação* de coordenação da componente física. Existem *agentes gestores* de nós, ou grupos de nós, que têm uma perspectiva local (respeitante aos nós que gerem) e um *agente supervisor*, que tem uma perspectiva global da rede (desempenha o papel da unidade de supervisão). Haverá fluxos de informação a um nível horizontal entre agentes gestores de nós ligados por relações de fornecedor-cliente e a um nível vertical, entre agentes gestores e o agente supervisor.

A preocupação do trabalho actual é a modelação dos objectos físicos. O conjunto de objectos (físicos) possíveis nesta ontologia é o *mundo físico* de suporte para os objectos virtuais.

Na Tabela 1 classificam-se os objectos desta ontologia, com as especializações respectivas. A seguir descrevem-se os objectos.

Tabela 1- Objectos, grupos e especializações.

Objecto	Descrição	Especializações
capacidade	Atributo correspondente a uma funcionalidade restrita.	acumulação, processamento
nó	Recurso renovável.	acumulador, produtor, transportador
arco	Relação fornecedor-cliente entre dois nós.	
rede	Nós ligados por relações fornecedor-cliente.	
dimensão	Conjunto de valores possíveis da mesma natureza.	produto, quantidade, tempo, local
evento	Acontecimento pontual.	
tarefa	Actividade, definida por eventos.	acumulação, produção, transporte
fluxo	Troca de produtos entre duas tarefas.	
plano	Grupo de tarefas ligadas por fluxos.	

2.1 Dimensão

Colocar o produto certo, na quantidade certa, no momento certo, no local certo parece ser o objectivo básico de um sistema de produção/distribuição. *Produto, quantidade, tempo e local* são *dimensões* de um espaço onde ocorre o processo de incorporação de valor num produto final. Podem considerar-se os graus de liberdade com os quais é possível jogar quando há que disponibilizar um produto ao cliente final da rede de produção/distribuição.

As dimensões de *quantidade* e *tempo* são, obviamente, omnipresentes numa cadeia de produção/distribuição: questões de quantidade e de tempo põem-se sempre que há que satisfazer uma procura (variável ao longo do tempo) no mercado, ou quando há que considerar custos (qual a quantidade económica? Quanto custa mais produzir/entregar em menos tempo?). Obviamente que questões de *local* afectarão também os produtores (proximidade da

¹⁶ *I.e.*, considera-se que a constituição da rede (nós e arcos) não varia durante a actividade de planeamento e escalonamento de tarefas que se pretende modelar.

fonte/fornecedor de matérias-primas, materiais ou componentes, proximidade em relação aos clientes imediatos - outros produtores, distribuidores). Também as questões de *produto* não deixarão de estar presentes nas decisões dos distribuidores (que tipo e variedade de produtos levar até ao mercado).

Para um modelo do domínio da produção/distribuição estas dimensões são conjuntos de valores possíveis para os produto, a quantidade, o tempo e o local. Valores particulares de produto, quantidade, tempo e local são usados referenciar e definir cada tarefa no contexto de uma rede de produção/distribuição envolvendo múltiplos intervenientes (os nós) e múltiplos produtos. Segue-se uma descrição do significado de cada dimensão.

- **Dimensão produto** - É o conjunto de produtos possíveis (incluindo matérias-primas, produtos intermédios ou finais da rede), isto é, o conjunto de produtos diferentes, trocáveis entre os nós da rede, ou entre os nós da rede e o exterior desta (o nó v_0). Este conjunto é finito e enumerável e os seus elementos podem ser símbolos ou números inteiros não negativos. Não se estabelece qualquer relação de ordem entre eles além de igualdade e desigualdade. A dimensão produto é formalmente representada pelo conjunto:

$$P_i = \{p_1, \dots, p_N\}$$

em que os N elementos p_i ($i=1, \dots, N$) identificam todos os produtos num modelo particular.

- **Dimensão quantidade** - É o conjunto de valores possíveis de quantidades (de um produto). Um valor de quantidade é um número real (que pode significar unidades, quilogramas, metros cúbicos, etc.). Valores positivos são para quantidades a efectivamente acumular ou processar; valores negativos podem ser usados para significar uma procura não satisfeita. Relações de ordem, igualdade e desigualdade existem entre os valores deste conjunto e correspondem às mesmas relações entre números reais. Simbolicamente, valores de quantidade são designados por q , ou q_i , em que i é um índice usado para distinguir diferentes quantidades num mesmo contexto.

- **Dimensão tempo** - É o conjunto de valores possíveis de instantes de tempo. Representado pelo conjunto dos números inteiros com as relações de ordem, igualdade e desigualdade. A *unidade de tempo* é o elemento de tempo mais pequeno que pode ser representado e o seu verdadeiro significado, e o verdadeiro significado de um valor de tempo, dependem da escala temporal adoptada.¹⁷ Simbolicamente, valores de tempo são designados por τ , ou τ_i , em que i é um índice usado para distinguir diferentes instantes num mesmo contexto.

- **Dimensão local** - É o conjunto de valores possíveis dos nós de rede.¹⁸ Os valores do conjunto de valores possíveis podem ser simbólicos, ou inteiros não negativos, sendo o conjunto finito e enumerável. Entre os valores deste conjunto apenas se estabelecem relações igualdade, ou desigualdade (para além das relações de fornecedor-cliente estabelecidas na rede). A dimensão local é formalmente representada pelo conjunto:

$$V = \{v_0, v_1, \dots, v_M\}$$

em que os $M+1$ elementos v_x ($x=0, \dots, M$) podem ser símbolos, ou inteiros e identificam os nós da rede, estando o exterior da rede representado pelo nó fictício v_0 .

¹⁷ Esta escala é uma convenção: 1 unidade de tempo poderá corresponder a 1 segundo, 1 minuto, 1 hora, 1 semana, etc., dependendo da granularidade temporal necessária e suficiente para o modelo particular de rede de produção/distribuição.

¹⁸ Que podem estar associados a localizações espaciais reais, *i.e.*, de fábricas, de armazéns.

Em relação à dimensão tempo define-se, por conveniência, *intervalo de tempo* como sendo um par de valores de tempo da forma:

$$\langle t_s, t_e \rangle$$

Em que t_s é o *instante inicial* e t_e o *instante final*, tais que $t_e > t_s$. A *duração* do intervalo $\langle t_s, t_e \rangle$ é de $t_e - t_s$ unidades de tempo e ele *contém temporalmente* os instantes consecutivos de t_s a $t_e - 1$ (incluindo estes). O intervalo de tempo mais pequeno considerado em termos de afectação de capacidade e escalonamento de tarefas é um *período temporal* e tem uma duração igual à de uma unidade de tempo. O período temporal com o instante de início t_x é referido por “o período temporal t_x ”, ou “o período t_x ”. Frequentemente far-se-á referência a um *horizonte temporal*, com o significado de um intervalo de tempo abrangendo um número inteiro de períodos temporais consecutivos, em que uma ou mais tarefas deverão ser escalonadas.

2.2 Evento

Um *evento* é um acontecimento pontual e corresponde a um tuplo de valores particulares contendo informação de produto, quantidade, tempo e local, isto é, um evento está associado a uma quantidade particular de um produto, num instante e num local. Como a informação relativa à quantidade só tem significado quando se refere a um produto, quantidades e produtos são, nos eventos, associados na forma de pares produto-quantidade. Também, um evento poderá conter mais de um desses pares, embora apenas um para cada produto diferente. Por exemplo um evento de início de uma tarefa de produção¹⁹ pode conter mais de um par produto-quantidade, que correspondem aos materiais e respectivas quantidades que têm de estar disponíveis e presentes no início da execução da tarefa.

Simbolicamente, eventos são designadas por e , ou e_i , , em que i é um índice usado para distinguir diferentes eventos num mesmo contexto. Formalmente, um evento é descrito por um triplo da forma:

$$\langle pq, t, v_x \rangle$$

em que t é o instante associado ao evento, v_x o nó (local) onde ele ocorre e $pq = \{ \dots, \langle p_i, q_i \rangle, \dots \}$ ($p_i \in P$) é o conjunto de pares produto-quantidade associados ao evento.

Exemplos:

1. $\langle \{ \langle p_1, q_1 \rangle, \langle p_2, q_2 \rangle, \langle p_3, q_3 \rangle \}, t_3, v_2 \rangle$ - Designa o valor de evento a que estão associados três produtos, p_1 , p_2 e p_3 , respectivamente nas quantidades q_1 , q_2 , e q_3 , o instante t_3 e o nó v_2 .
2. $\langle \{ \langle \text{parafusoM5}, 3000 \rangle \}, 320, \text{ArmazemX30} \rangle$ - Evento em que 3000 unidades do produto *parafusoM5* saíram/entraram no local *ArmazemX30*, no instante 320.

2.3 Capacidade

Em geral, os recursos estão sujeitos a restrições que têm a ver com limitações de capacidade: caso dos recursos ditos *renováveis*. Ou então estão associados a uma quantidade de valor, ou

¹⁹Ver mais adiante, na secção sobre tarefas.

energia, neles incorporada e à possibilidade de serem produzidos ou consumidos: os recursos ditos *não renováveis*. Segundo [Blazewicz 1994] os recursos renováveis²⁰ estão sujeitos a restrições que dizem respeito a uma limitação ao seu uso total em cada momento: quando um recurso é afectado a uma tarefa, a sua capacidade disponível é reduzida numa quantidade igual à necessária à execução da tarefa durante o intervalo de execução; a partir do tempo de fim da tarefa aquela quantidade de capacidade fica novamente disponível. Os recursos não renováveis (ou consumíveis/prodúzíveis²¹) estão sujeitos a restrições que têm a ver com limitações ao seu consumo, ou produção, até dado momento: se um recurso não renovável é consumido numa tarefa, não pode voltar a sê-lo por outra tarefa; se é produzido por uma tarefa a sua quantidade é sempre limitada até um certo momento no tempo.

Nesta ontologia, os produtos são os recursos não renováveis — materiais, produtos intermédios, produtos finais — e os nós de rede (ver mais adiante) são os recursos renováveis — fábricas, linhas de produção, máquinas, armazéns, frotas ou veículos de transporte.

A *capacidade* disponibilizada por um nó, genericamente designada por C , é um atributo que o caracteriza quanto à sua natureza de recurso limitado. A capacidade de um nó é qualificada por um tipo e quantificada por um valor limite, ou máximo (sempre não negativo), genericamente designado por $C_{\max}(t)$. Um nó pode disponibilizar apenas um tipo de capacidade que pode dedicar a um produto, ou partilhar por vários produtos.²² Há dois tipos de capacidade:

- **Capacidade de acumulação**, ou capacidade de tipo A - É um tipo de capacidade limitada em quantidade e está disponível nos nós acumuladores (ver adiante). $A_{\max}(t)$ significa a quantidade máxima de um produto que um nó acumulador pode acumular em cada período t , se o nó estivesse dedicado apenas a esse produto, medida em *unidades de capacidade* do nó.
- **Capacidade de processamento**, ou capacidade de tipo W - É um tipo de capacidade limitada em quantidade e tempo e está disponível nos nós processadores (ver adiante). $W_{\max}(t)$ significa a quantidade máxima de um produto *por unidade de tempo*²³ que um nó processador pode processar (*i.e.*, produzir ou transportar) em cada período t , se o nó estivesse dedicado apenas a esse produto, medida em *unidades de capacidade* do nó.

A unidade de capacidade é sempre relativa ao um nó em questão e é referida por *unidade de produto padrão de acumulação* (uppa), para uma capacidade de acumulação, ou por *unidade de produto padrão de processamento* (uppp), para uma capacidade de processamento. Estas são convenções internas ao nó que servem para medir a capacidade consumida por quantidades dos produtos de saída associadas a tarefas cujo escalonamento é pedido e têm interesse quando a capacidade do nó é partilhada por produtos diferentes. Para unidade de medida interna de capacidade, cada nó convencionou a unidade de um produto de saída real, ou fictício, que é tomado como *produto padrão*. A capacidade consumida por uma unidade de cada produto de saída disponibilizada com a execução de uma tarefa pelo nó pode então ser medida em termos do número destas unidades de produto padrão.

²⁰Uma outra designação possível seria recursos reutilizáveis (ver, por exemplo [Beck 1995]).

²¹Uma designação alternativa possível será a de recursos não reutilizáveis, ou então recursos consumíveis, ou recursos produzíveis (ver, por exemplo [Beck 1995]).

²²Permitir a modelação de recursos renováveis cuja capacidade é partilhada por diferentes tarefas que disponibilizam produtos diversos é uma característica saliente desta ontologia.

²³Trata-se, portanto, de uma *taxa de processamento*.

A medida da capacidade de acumulação é uma medida de quantidade, ou de espaço²⁴ utilizado no armazenamento de produtos. Por exemplo, suponha-se que um nó acumulador tem dois produtos de saída, p_x e p_y , e que p_y ocupa duas vezes o espaço de armazenamento que p_x ocupa. Isto quer dizer que, se o nó estivesse dedicado a acumular um só dos dois produtos, no máximo acumularia para p_z metade do número de unidades de p_y . Se internamente p_x é tomado como produto padrão, uma uppa do nó equivale a uma unidade de p_x ; cada unidade de p_x consome então uma unidade de capacidade e cada unidade de p_y consome duas unidades de capacidade do nó.

A medida da capacidade de processamento é uma medida de quantidade por unidade de tempo, ou taxa de processamento utilizada. Por exemplo, suponha-se que um nó processador tem dois produtos de saída, p_x e p_y , e que p_y é processado no dobro do tempo que p_x . Isto quer dizer que, se o nó estivesse dedicado a processar um só dos dois produtos, no máximo e num mesmo período, processaria para p_y metade do número de unidades de p_x . Se internamente p_x é tomado como produto padrão, uma uppp do nó equivale a uma unidade de p_x ; cada unidade de p_x consome então uma unidade de capacidade e cada unidade de p_y consome duas unidades de capacidade do nó.

A capacidade máxima $C_{\max}(t)$ significa um valor máximo de quantidade capacidade (não negativo) que um nó pode aplicar, em um ou mais produtos, *no contexto de uma rede*. Para um nó particular este valor máximo poderá variar no tempo, tanto por a capacidade do nó poder ser ampliada ou reduzida, como por a capacidade que o nó disponibiliza para a rede em questão poder variar no tempo.

2.3.1 Gestão da Capacidade

Para ser possível a afectação da capacidade de um nó a uma tarefa é necessário dispor da informação de que capacidade está disponível em cada período nesse nó. Para isso, pelo menos a *capacidade máxima* e a *capacidade utilizada* (*i.e.*, afectada a tarefas, ou ocupada) em produtos de um nó, devem ser registadas explicitamente para cada período; a *capacidade disponível* em cada período pode ser calculada a partir daqueles valores. $C_{\max}(t)$, $C(t)$ e $c(t)$ denotam respectivamente a capacidade máxima, a capacidade disponível e a capacidade utilizada de um nó no período t . Quando a capacidade de um nó é partilhada por vários produtos, $c_j(t)$ denota a capacidade utilizada no produto p_j em t . Os C 's e os c 's podem ser substituídos por A 's e a 's ou por W 's e w 's, dependendo do tipo de capacidade (de acumulação, ou de processamento) em questão. De um modo geral, a capacidade disponível de um nó em cada período t , $C(t)$, é dada por:

$$C(t) = C_{\max}(t) - \sum_{j=1}^n c_j(t)$$

em que n é o número de produtos de saída do nó, sendo p_1, \dots, p_n , esses produtos. Restrições de capacidade impõem que seja $C(t) \geq 0$, para qualquer t , em qualquer situação fisicamente possível.

²⁴Ou, alternativamente, área, ou peso ou outra grandeza considerada relevante no armazenamento.

2.3.2 Perfil de Capacidade

Um *perfil de capacidade* regista os valores da quantidade de capacidade em cada período (assume-se que estes valores são constantes dentro de cada período) para um dado nó. Representa o estado interno do nó, em termos de capacidade, em sucessivos períodos ao longo do tempo, isto é, a história²⁵ planeada da evolução da capacidade do nó. Podemos pensar num perfil de capacidade como sendo uma função que mapeia períodos temporais em valores de capacidade, que pode ser alterada (quando os valores de capacidade do perfil são alterados).²⁶ Haverá, para cada nó, um perfil de capacidade para $C_{\max}(t)$, um perfil de capacidade $c_j(t)$ para cada produto de saída do nó (p_j) e um perfil de capacidade para $C(t)$.²⁷

A título de exemplo, representam-se na Figura 2 um perfil de capacidade máxima $C_{\max}(t)=5$, constante (área entre o eixo do tempo e a linha horizontal a 5 unidades de capacidade), e um perfil de capacidade utilizada, $c(t)$ (área a tracejado), num horizonte temporal abrangendo os períodos de 0 a 14 (intervalo de 0 a 15). O perfil de capacidade disponível é representado pela área a branco. Nesta figura pode-se ver que a capacidade utilizada, por exemplo, nos intervalos de 2 a 6, 6 a 9 e 12 a 14 é, respectivamente de 3, 2 e 3 unidades de capacidade (sendo a capacidade disponível de 2, 3, e 2 unidades de capacidade nos mesmos intervalos, respectivamente).

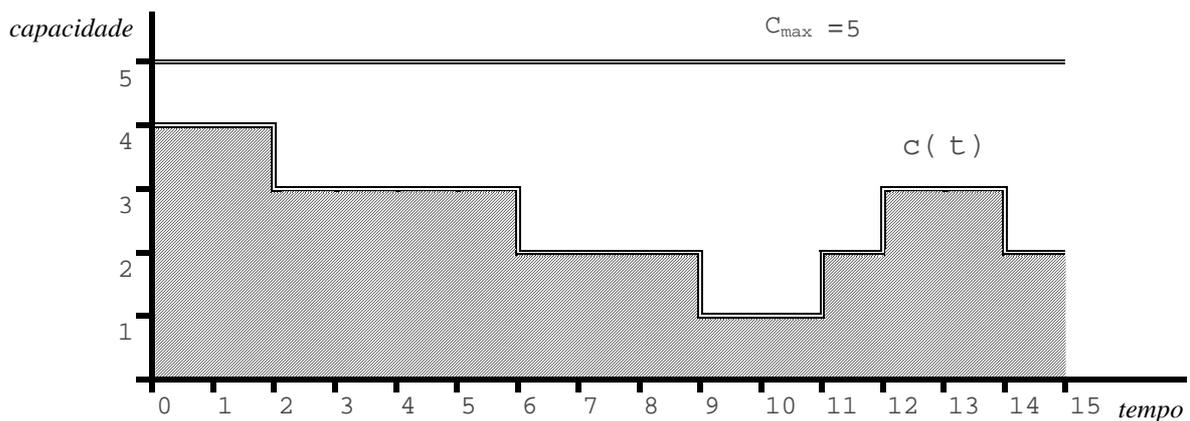


Figura 2- Perfil de capacidade.

Para uma capacidade de acumulação estes valores significam quantidades de um produto estaticamente acumuladas nos intervalos referidos. Para uma capacidade de processamento estes valores significam quantidades de um produto produzidas ou transportadas em cada período abrangido por cada intervalo referido. Nos períodos 2, 3, 4 e 5 (intervalo de 2 a 6), por exemplo, $c(t)=3$ o que significa que 3 unidades de capacidade estão sendo utilizadas e 2 estão livres. Para uma capacidade particular isto significaria também que:

²⁵Ver por exemplo [Zweben 1994b] ou [Williams 1990].

²⁶Isto é, podemos ver um perfil de capacidade como um conjunto de pares $\{ \dots, \langle t_k, C_k \rangle, \dots \}$, em que os t_k são períodos e os C_k os valores de capacidade a eles associados, em que os valores C_k podem ser alterados. Por exemplo, com escalonamento de tarefas novas, ou cancelamento de tarefas anteriormente escalonadas, os valores C_k do perfil de capacidade disponível são alterados.

²⁷ Para além destes, podem conceber-se também o perfil de capacidade reservada, que regista a capacidade reservada (ver secção sobre Reserva de Capacidade, mais adiante) e perfis de conflitos, que registam conflitos de capacidade, *i.e.*, períodos onde a capacidade disponível seria negativa (devido a sobreafectação ou a sobrerreserva de capacidade).

- Para uma capacidade do tipo A, 3 unidades de produto padrão de acumulação estão armazenadas e há ainda espaço para mais 2.
- Para uma capacidade do tipo W, 3 unidades de produto padrão de processamento estão sendo processadas em cada período (totalizando $4 * 3 = 12$ unidades processadas entre $t = 2$ e $t = 6$), podendo ainda processar-se adicionalmente 2 unidades em cada período.

2.3.3 Afecção de Capacidade

Ao escalonar uma tarefa para ser realizada por um nó, é feita uma *afecção de capacidade* de parte da capacidade do nó à tarefa.

Para afectar capacidade de acumulação a uma tarefa a realizar por um nó acumulador devem ser dados o número de unidades de produto padrão de acumulação q e os instantes inicial e final da tarefa, t_s e t_e (de duração $t_e - t_s$). A afecção é possível, e a tarefa é realizável pelo nó, se em todos os períodos de t_s a $t_e - 1$ (incluindo estes) houver capacidade disponível igual ou superior a q , isto é, se:

$$C(t) \geq q \quad \text{para } t \geq t_s \text{ e } t < t_e$$

Ao ser realizada a afecção de capacidade o perfil de capacidade utilizada, $c(t)$, é modificado, resultando dessa modificação um perfil $c'(t)$, tal que:

$$c'(t) = c(t) \quad \text{para } t < t_s \text{ ou } t \geq t_e \text{ e}$$

$$c'(t) = c(t) + q \quad \text{para } t \geq t_s \text{ e } t < t_e$$

Por consequência, o perfil de capacidade disponível, $C(t)$, resulta modificado originando um perfil $C'(t)$, tal que:

$$C'(t) = C(t) \quad \text{para } t < t_s \text{ ou } t \geq t_e \text{ e}$$

$$C'(t) = C(t) - q \quad \text{para } t \geq t_s \text{ e } t < t_e$$

Por exemplo, assumindo uma capacidade de acumulação, para o estado de capacidade representado na Figura 2, a afecção de capacidade com $q = 1$, $t_s = 3$ e $t_e = 11$ (duração 8) é possível e, após realizada altera os perfis para o estado representado na Figura 3.

Para afectar capacidade de processamento a uma tarefa a realizar por um nó processador devem ser dados o número de unidades de produto padrão de processamento q , o instante inicial requerido para a tarefa t_s e a quantidade de capacidade a afectar durante a execução da tarefa, c (em unidades de produto padrão de processamento). A afecção é possível, e a tarefa é realizável pelo nó, se existirem períodos consecutivos, a partir de t_s (inclusive), com capacidade disponível igual ou superior a c , em número necessário para processar toda a quantidade q , isto é, se:

$$C(t) \geq c \quad \text{para } t \geq t_s \text{ e } t < t_s + \text{ceiling}(q/c) \quad 28$$

sendo a duração da tarefa, dada por $t_e - t_s = \text{ceiling}(q/c)$ e t_e dado por $t_e = t_s + \text{ceiling}(q/c)$. Ao ser realizada a afecção de capacidade o perfil de capacidade utilizada, $c(t)$, é modificado, resultando dessa modificação um perfil $c'(t)$, tal que:

²⁸ Em que a função *ceiling* arredonda um número para o próximo inteiro. As operações *div* e *mod* especificam, respectivamente, a divisão inteira, e o resto da divisão inteira.

$$c'(t) = c(t) \quad \text{para } t < t_s \text{ ou } t \geq t_e \text{ e}$$

$$c'(t) = c(t) + c \quad \text{para } t \geq t_s \text{ e } t < t_e$$

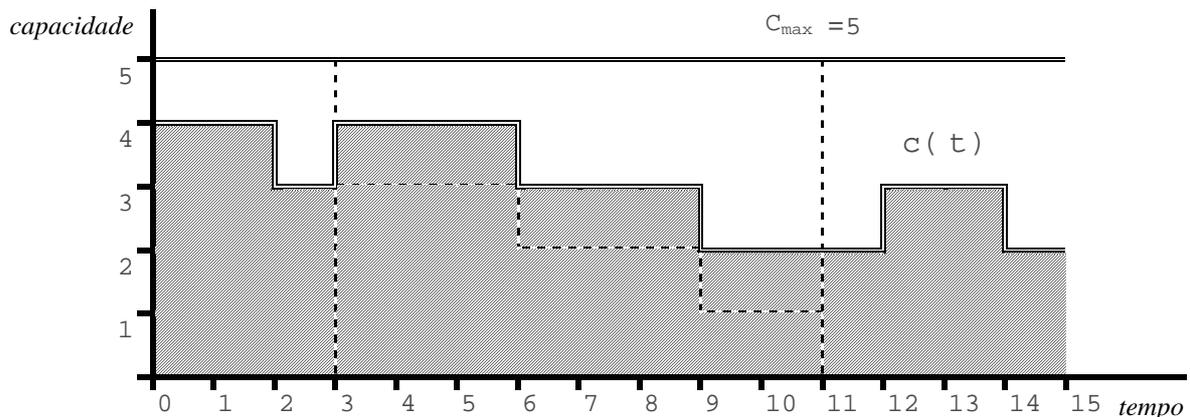


Figura 3- Exemplo de perfil de capacidade utilizada.

Por consequência, o perfil de capacidade disponível, $C(t)$, resulta modificado originando um perfil $C'(t)$, tal que:

$$C'(t) = C(t) \quad \text{para } t < t_s \text{ ou } t \geq t_e \text{ e}$$

$$C'(t) = C(t) - c \quad \text{para } t \geq t_s \text{ e } t < t_e$$

Por exemplo, assumindo que no perfil de capacidade da Figura 2 se representa capacidade de processamento utilizada, para o estado de capacidade representado a afectação de capacidade com $q=8$, $t_s=3$ e $c=1$ é possível e, após realizada altera os perfis para o estado representado na Figura 3, resultando numa duração de tarefa de 8 (num intervalo de 3 a 11).

Note-se que, enquanto que a duração da execução de uma tarefa que requer capacidade de tipo A tem de ser imposta exogenamente (a capacidade de tipo A é estática e serve para actuar como tampão) para uma tarefa que requer capacidade de tipo P a duração é um resultado da afectação dessa capacidade à tarefa (e depende da quantidade de capacidade c disponibilizada para a execução da tarefa).

2.3.4 Reserva de Capacidade

Préviamente à afectação de capacidade de um nó para execução de uma tarefa, quando o intervalo de execução dela ainda não pode ser conhecido, mas é sabido que deve estar contido num dado horizonte temporal, pode fazer-se uma *reserva de capacidade* para a tarefa.²⁹ O horizonte temporal funciona assim como uma janela temporal no qual o intervalo da tarefa terá de estar temporalmente contido. Isto é, se o horizonte temporal é um intervalo $\langle t_a, t_b \rangle$, para o intervalo de execução da tarefa, $\langle t_s, t_e \rangle$, terá de ser $t_s \geq t_a$ e $t_e \leq t_b$.

Uma reserva de capacidade de acumulação de q unidades, de duração Δt , para um dado horizonte temporal entre $\langle t_a, t_b \rangle$ é possível se existe pelo menos um intervalo $\langle t_s, t_e \rangle$ tal

²⁹ Reservas de capacidade poderiam ser registadas em perfis de capacidade apropriados (perfis de reserva de capacidade), com a finalidade de permitir saber se a capacidade reservada excede ou não a capacidade disponível em cada período; no entanto, a representação de perfis de capacidade reservada põe o problema de, precisamente, como determinar esta condição.

que $t_s \geq t_a$, $t_e \leq t_b$ e $t_e - t_s = \Delta t$, em que a afectação de capacidade de acumulação de q unidades é possível.

Uma reserva de capacidade de processamento de q unidades utilizando c unidades por período, para um dado horizonte temporal entre t_a e t_b é possível se existe pelo menos um intervalo de tempo $\langle t_s, t_e \rangle$ tal que $t_s \geq t_a$, $t_e \leq t_b$, em que a afectação de capacidade de processamento de q unidades, utilizando c unidades por período, é possível.

2.4 Nó

Um nó é um recurso, ou grupo de recursos renováveis (*i.e.*, uma fábrica, um armazém, uma unidade de transporte) e corresponde às unidades de negócio numa EE. A estrutura dos recursos renováveis de produção/distribuição de produtos é uma rede, composta por nós e arcos direccionados ligando os nós. Os arcos representam relações de fornecedor-cliente e os nós desempenham tarefas de processamento (produção ou transporte) ou acumulação de produtos.

Os nós têm entradas e saídas de produtos. Produtos à entrada de um nó provêm de fluxos³⁰ de outros nós, ditos *nós fornecedores* e correspondem a materiais para consumo do nó. Produtos à saída de um nó geram fluxos para outros nós, ditos *nós clientes*. A Figura 4 contém a representação gráfica de um nó. As setas representam fluxos de produtos de entrada e de saída (referidos, respectivamente por materiais e produtos). TN designa o tipo de nó, $C_{max}(t)$ e $c_i(t)$ representam, respectivamente, a capacidade máxima do nó e a parte dessa capacidade utilizada para cada produto de saída p_i , em cada instante t .

Um nós pode ser classificado, conforme o tipo de capacidade que disponibiliza, como:

- **Nó acumulador**, ou nó de tipo S - Disponibiliza capacidade de acumulação, isto é, capacidade de tipo A. Realiza tarefas de acumulação (tarefas do tipo S, ver adiante);
- **Nó processador**, nó de tipo P ou T - Disponibiliza capacidade de processamento, isto é, capacidade de tipo W. Um nó de tipo P, ou **nó produtor**, realiza tarefas de produção (tarefas do tipo P, ver adiante); um nó de tipo T, ou **nó transportador**, realiza tarefas de

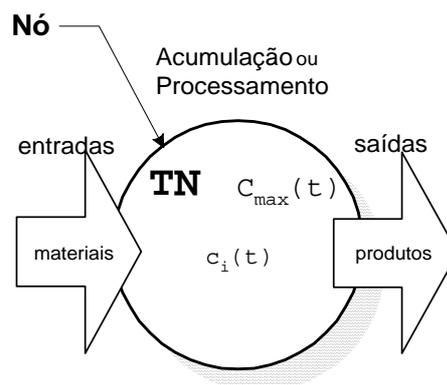


Figura 4- Um nó.

transporte (tarefas do tipo T, ver adiante).

³⁰Ver adiante, a secção sobre fluxos, no contexto das tarefas.

Um nó acumulador armazena estaticamente produtos. Os produtos à entrada e à saída de um acumulador são os mesmos e existe conservação da sua quantidade,³¹ apenas diferindo, ou não, na coordenada tempo.³² Um nó acumulador permite modelar um armazém ou espaço de armazenamento para stock materiais, produtos intermédios, ou produtos acabados.

Um nó processador processa produtos de entrada para obter produtos de saída, dependendo a duração de uma tarefa de processamento da taxa de processamento dedicada ao produto da tarefa e também da quantidade de produto. No caso de um nó produtor, os produtos de entrada são transformados para obter produtos de saída. Produtos de entrada e de saída são diferentes e para a produção de cada produto de saída são, em geral, necessários mais de um produto de entrada. Um nó produtor permite modelar uma fábrica. Um nó transportador toma produtos de saída de um outro nó e, por execução de tarefas de transporte, torna-os disponíveis a outro nó (como produtos de entrada desse nó). Neste caso, os produtos à entrada e à saída são os mesmos, havendo conservação da sua quantidade (semelhante ao nó acumulador). Um nó transportador permite modelar uma frota de veículos de transporte (camiões, barcos, aviões, etc.).

Poderá conceber-se um caso misto de um nó processador, simultâneamente produtor e transportador, *produtor/transportador* ou tipo P/T. Isto permitirá modelar unidades de transporte nas quais tarefas de produção (por exemplo, montagem) são executadas durante o transporte.

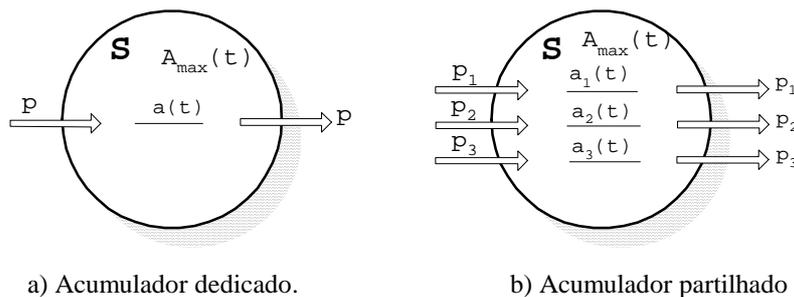


Figura 5- Nós acumuladores (exemplo de representação gráfica).

Quanto ao número de produtos de saída, um nó pode ser:

- *Nó dedicado* - Tem um único produto de saída (a capacidade do nó é dedicada a um único produto);
- *Nó partilhado* - Tem mais de um produto de saída (a capacidade do nó é partilhada por vários produtos).

Numa representação gráfica, um nó acumulador é representado como se exemplifica na Figura 5. Na Figura 5-a) e na Figura 5-b) representam-se respectivamente, um acumulador dedicado e um acumulador partilhado (neste último caso por 3 produtos: P_1 , P_2 e P_3).

³¹Há conservação de quantidade de produtos à entrada e à saída, no sentido em que, quantidades que entram e saem num intervalo de tempo diferem na quantidade acumulada nesse intervalo.

³²No sentido em que uma determinada quantidade de material/produto poderá ter ficado armazenado mais ou menos tempo.

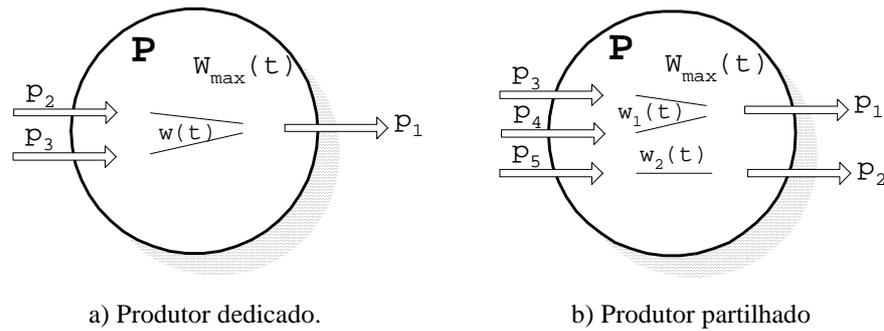


Figura 6- Nós produtores (exemplo de representação gráfica).

Um processador é esquematicamente representado como se exemplifica na Figura 6 e na Figura 7. A Figura 6-a) representa um produtor dedicado com um produto de saída p_1 e dois produtos de entrada, p_2 e p_3 e a Figura 6-b) um produtor partilhado com dois produtos de saída, p_1 e p_2 , e com os produtos de entrada p_3 , p_4 e p_5 . A Figura 7-a) representa um transportador dedicado (transporta produto p) e a Figura 7-b) um processador/transportador partilhado (transporta produtos p_1 e p_2).

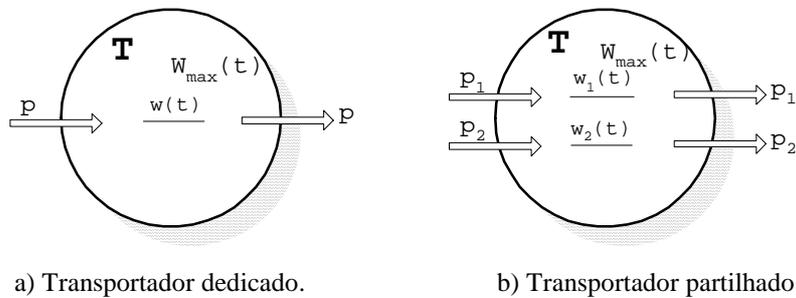


Figura 7- Nós transportadores (exemplo de representação gráfica).

Formalmente um nó é descrito por um par da forma:

$$\langle I, U \rangle$$

em que I é a *interface* do nó e U o *núcleo* do nó. A interface relaciona o nó como seu exterior e é um 5-tuplo da forma:

$$\langle v, TN, p, m, b \rangle$$

Sendo:

- $v \in V$, em que v é um símbolo que identifica unívocamente o nó no contexto de uma rede;
- $TN \in \{S, P, T\}$, sendo S , P ou T , respectivamente para nós acumuladores, processadores ou transportadores;
- $p = \{p_j\}$, em que p é o conjunto de produtos de saída do nó ($p \subset P$). Se $|p|=1$ trata-se de um nó dedicado;
- $m = \{m_i\}$, em que m é o conjunto de produtos de entrada do nó ($m \subset P$);
- $b = \{b_{i,j}\}$, ou lista de materiais do nó,³³ é um conjunto de números não negativos, em que cada $b_{i,j}$ significa a quantidade de produto de entrada p_i ($p_i \in m$) necessária para

³³ b contém a informação de uma lista de materiais, ou *bill-of-materials*.

disponibilizar uma unidade de produto de saída p_j ($p_j \in p$). Em nós de tipo S e T tem-se $p=m$, correspondendo b a uma matriz identidade.

O núcleo \mathbb{U} , regista o estado actual do nó e é um triplo da forma:

$$\langle r, C_{\max}(t), c(t) \rangle$$

Sendo:

- $r = \{r_j\}$ um conjunto de factores de conversão (números não negativos) r_j , um por cada elemento de p ($|r| = |p|$), que indica quantas unidades de capacidade do nó cada produto de saída p_j ($p_j \in p$) utiliza;
- $C_{\max}(t)$ ($A_{\max}(t)$ para o caso de capacidade de acumulação e $W_{\max}(t)$ para o caso de capacidade de processamento) é o perfil de capacidade máxima, que regista a capacidade máxima do nó em cada período t ;
- $c(t) = \{c_j(t)\}$ ($c(t) = \{a_j(t)\}$ para o caso de capacidade de acumulação e $c(t) = \{w_j(t)\}$ para o caso de capacidade de processamento) é um conjunto de perfis de capacidade utilizada, um para cada produto de saída ($|c(t)| = |p|$), em que cada $c_j(t)$ indica a quantidade de capacidade utilizada no produto de saída ($p_j \in p$) em cada período t .

2.5 Arco

Um *arco* é uma ligação direccionada estabelecida entre dois nós de uma rede³⁴ associada à troca possível de fluxos de produtos entre os dois nós. Um arco liga uma saída de um nó a uma entrada de outro nó e indica que é possível existir um fluxo de produto entre os dois. Apesar de significarem canais de transmissão de produtos, não é associado, aos arcos, qualquer tipo de capacidade de transmissão: eles apenas representam relações *fornecedor-cliente* entre pares de nós de uma mesma rede.³⁵

Formalmente, um arco ligando o nó v_x ao nó v_y , designado por arco $\mathbb{E}_{x,y}$, é descrito por um triplo da forma:

$$\langle v_x, v_y, d \rangle$$

Sendo:

- $v_x \in \mathcal{V}$ o nó fornecedor;
- $v_y \in \mathcal{V}$ o nó cliente;
- $d = \{d_k\}$, em que d é um o conjunto de produtos ($d \subset P$), não vazio ($|d| > 0$), de que o nó v_x é fornecedor e o nó v_y é cliente, isto é, $d = p^x \cap m^y$ (p^x e m^y representando, respectivamente, o conjunto de produtos de saída de v_x e o conjunto de produtos de entrada de v_y).

³⁴Ver adiante, a secção sobre redes.

³⁵No que respeita a uma hipotética capacidade máxima de transmissão de material/produto tudo se passa como se fosse, para um arco, infinita. Quer dizer, seria imposta pelos nós nos extremos: sendo limitada à quantidade máxima de produto que um nó pode fornecer por unidade de tempo ou à quantidade máxima que o outro nó pode receber por unidade de tempo.

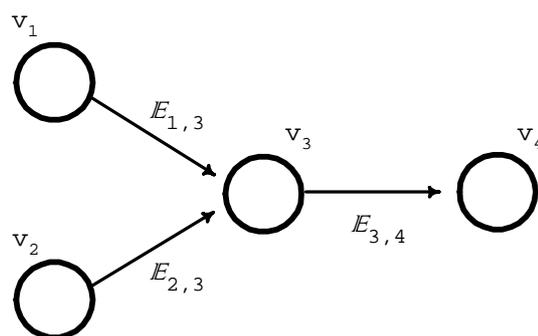


Figura 8- Arcos entre nós de uma rede (exemplo).

Os arcos entre pares de nós de uma rede são grãficamente representados por setas cujo sentido indica o sentido possível dos fluxos de produtos de um nó para o outro. Na Figura 8 representa-se, como exemplo, um segmento de rede com 4 nós, etiquetados por v_1 , v_2 , v_3 , e v_4 , ligados pelos arcos $E_{1,3}$, $E_{2,3}$ e $E_{3,4}$. Neste exemplo, os nós v_1 e v_2 são nós fornecedores do nó v_3 e este é nó cliente deles. Por sua vez, o nó v_3 é nó fornecedor do nó v_4 e este é cliente do nó v_3 .

2.6 Rede

Uma *rede* é um conjunto de *nós ligados por arcos* de forma acíclica.³⁶ Produtos são acumulados e processados em nós de uma rede e transferidos de uns nós para outros no sentido dos arcos para obter produtos finais da rede. Os arcos da rede significam, portanto, um conjunto de canais de troca de produtos, entre grupos de recursos.

Um nó de rede é um *nó extremo* da rede se não tem pelo menos, um nó fornecedor para, pelo menos, um dos seus produtos de entrada (materiais), à excepção do nó v_0 , ou não tem pelo menos, um nó cliente para, pelo menos, um dos seus produtos de saída, à excepção do nó v_0 .³⁷ No primeiro caso é apelidado de *nó origem*, ou *nó de matéria-prima*, no segundo de *nó terminal*, ou *nó de retalho*.³⁸ O nó v_0 é um nó fictício que representa o exterior da rede. De facto pode dizer-se, portanto, que todos os nós origem são nós clientes de v_0 e que todos os nós terminais são nós fornecedores de v_0 .

Uma rede é formalmente descrita por um par da forma:

$\langle V, E \rangle$

Sendo:

- $V = \{v_0, v_1, \dots, v_M\}$, o conjunto de identificadores de nós da rede ($M+1$ nós, em que v_0 é o nó fictício que representa o exterior da rede);

³⁶ Isto significa que no conjunto de caminhos possíveis que são indicados pelos arcos da rede não há caminhos com ciclos.

³⁷ Podem imaginar-se arcos partindo dos nós terminais *dirigidos para o exterior da rede* e que significam a possibilidade de existir *consumo de fluxos de saída* dos nós terminais, ou arcos *vindos do exterior da rede* e terminando nos nós origem, que significam a possibilidade de existir *geração de fluxos de entrada* para os nós origem.

³⁸ Na literatura, *raw material node* e *retail node*, respectivamente (ver, por exemplo, [Williams 1983]).

– $E = \{ \dots, E_{x,y}, \dots \}$, o conjunto de arcos da rede.

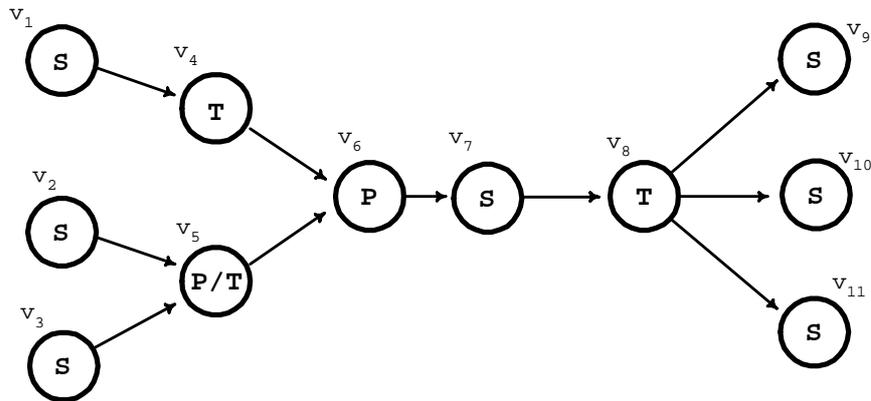


Figura 9- Uma rede.

Uma rede é representada por um *grafo* acíclico direccionado onde se incluem os nós e os arcos. Os nós são representados por nós do grafo e os arcos pelos arcos direccionados do mesmo. Como exemplo, na Figura 9, é grãficamente representada uma rede com 11 nós, rotulados de v_1 a v_{11} (v_0 não é representado), dos quais $v_1, v_2, v_3, v_7, v_9, v_{10}$ e v_{11} são acumuladores e v_4, v_5, v_6 e v_8 processadores, sendo v_9, v_{10} e v_{11} nós terminais e $v_1, v_2,$ e v_3 nós origem. Redes permitem modelar redes de produção/distribuição em que as unidades de recursos (fábricas, armazéns, unidades de transporte) das empresas intervenientes são representadas pelos nós e as ligações fornecedor-cliente representadas pelos arcos.

2.7 Tarefa

Uma *tarefa* é a unidade básica de escalonamento no ambiente logístico da produção/distribuição. A *execução* de uma tarefa consome *produtos de entrada* e torna disponível um único *produto de saída* (o produto da tarefa) utilizando, para isso, a capacidade de um nó executor. Formalmente uma tarefa \odot , é definida por um par de *eventos extremos* da forma:

$\langle e_s, e_e \rangle$

Sendo:

- e_s o *evento de início*, ou de entrada, da tarefa
- e_e o *evento de fim*, ou de saída, da tarefa

Estes eventos descrevem os valores das dimensões produto, quantidade, tempo e local, à entrada e à saída da tarefa (no início e no fim do intervalo de execução da tarefa). Essa execução envolve, no nó executor da tarefa, a entrada de *produtos de entrada* em determinadas quantidades no instante de início e a saída de um único *produto de saída*, em determinada quantidade no instante de fim da tarefa. Os eventos de início e fim de uma tarefa correspondem a alterações no estado do nó onde a tarefa é executada, pois originam um decremento da capacidade disponível respectiva durante o intervalo de execução da tarefa.

Conforme o tipo de capacidade requerida uma tarefa podem ser classificada como:

- **Tarefa de acumulação**, ou tarefa de tipo S - Requer capacidade de acumulação, sendo portanto, executável por um nó acumulador (*i.e.*, um nó de tipo S) que tenha um produto de

saída igual ao da tarefa. Ambos os eventos de início e de fim têm associados iguais valores de produto, quantidade e local. A duração de uma tarefa de acumulação é imposta exogenamente, tipicamente por tarefas antecessoras (tarefas fornecedoras) e sucessoras (tarefas clientes).³⁹

- **Tarefa de processamento**, ou tarefa de tipo P ou T - Requer capacidade de processamento. Uma tarefa de tipo P, ou **tarefa de produção**, é executável por um nó produtor (*i.e.*, um nó de tipo P) que tenha o mesmo produto de saída da tarefa. Os eventos de início e de fim de uma tarefa de tipo P diferem nos valores de produto (havendo, em geral, mais de um produto de entrada), quantidade e tempo, mas são iguais em termos de valor de local. Uma tarefa de tipo T, ou **tarefa de transporte**, é executável por um nó transportador (*i.e.*, um nó de tipo T) que tenha o mesmo produto de saída da tarefa. Os eventos de início e de fim de uma tarefa de tipo T têm iguais valores de produto e quantidade mas diferem nos valores de tempo e local.⁴⁰ Tarefas de processamento (tipo P, ou T) têm uma duração imposta pelo processador executante (consequência da capacidade de processamento limitada deste).

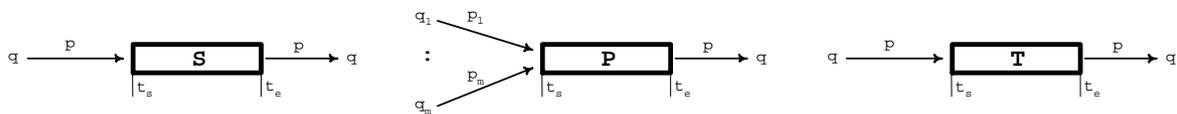


Figura 10- Exemplos de tarefas de tipo S, P e T.

Graficamente as tarefas representam-se como na Figura 10, em que as barras são as tarefas e as setas correspondem a fluxos (ver mais adiante) de produtos de entrada e saída. Como exemplo, para descrever as tarefas de tipo S, P e T, da Figura 10, usar-se-iam pares de eventos da forma:

$\langle \langle \langle p, q \rangle \rangle, t_s, v \rangle, \langle \langle \langle p, q \rangle \rangle, t_e, v \rangle \rangle$ (para a tarefa de tipo S)

$\langle \langle \langle \langle p_1, q_1 \rangle, \dots, \langle p_m, q_m \rangle \rangle, t_s, v \rangle, \langle \langle \langle p, q \rangle \rangle, t_e, v \rangle \rangle$ (para a tarefa de tipo P)

$\langle \langle \langle \langle p, q \rangle \rangle, t_s, v_x \rangle, \langle \langle \langle p, q \rangle \rangle, t_e, v_y \rangle \rangle$ (para a tarefa de tipo T)⁴¹

Poderá conceber-se um caso misto de uma tarefa de processamento, simultaneamente de produção e transporte, *produção/transporte* ou tipo P/T, semelhante à tarefa de tipo P com a exceção de os eventos de início e fim diferirem nos valores de local.

2.7.1 Detalhe de Tarefas

Uma tarefa \odot pode ser *detalhada* num grupo de uma ou mais *subtarefas* \odot_i , que adicionam mais detalhe à *tarefa mãe* \odot , através de informação mais detalhada, ou elaborada. A tarefa mãe é uma abstracção das subtarefas. Cada subtarefa \odot_i satisfaz às seguintes restrições:

- Cada subtarefa \odot_i é do mesmo tipo (S, P ou T) da tarefa mãe, \odot ;
- Cada subtarefa \odot_i tem os mesmos produtos e locais de entrada e saída que \odot ;

³⁹ Pela razão de que a acumulação serve de tampão, ou *buffer*, entre tarefas antecessoras e sucessoras.

⁴⁰ Os valores diferentes de local são o nó fornecedor (no evento de início) e o nó cliente (no evento de fim).

⁴¹ Neste último caso, v_x e v_y são os nós que executam as tarefas fornecedor e cliente da tarefa, respectivamente.

- Para o produto de saída e para cada produto de entrada, o grupo de subtarefas \odot_i totaliza as quantidades correspondentes para a tarefa mãe, \odot ;
- O intervalo $\langle t_s^i, t_e^i \rangle$ de cada \odot_i está temporalmente contido no intervalo $\langle t_s, t_e \rangle$ de \odot (i.e., $t_s^i \geq t_s$ e $t_e^i \leq t_e$).

Conforme sejam ou não detalháveis, as tarefas podem classificar-se, portanto, em:

- *Tarefa elementar*, ou atómica - Se a sua execução da tarefa deve decorrer sem interrupção, num intervalo contínuo (num certo número de períodos consecutivos) entre os instantes do evento de início e do evento de fim. Uma tarefa elementar está completamente definida (não sendo possível detalhá-la) e pode ser escalonada e ser-lhe afectada capacidade para execução.
- *Tarefa não elementar*, ou não atómica - Quando a execução da tarefa deve ocorrer em um ou mais intervalos temporalmente contidos no intervalo definido pelos instantes do evento de início e do evento de fim da tarefa. Uma tarefa não elementar é detalhável em uma ou mais tarefas e, enquanto o não for, está apenas parcialmente definida, apenas se podendo, para ela, reservar capacidade.

Uma subtarefa pode ser detalhada: detalhe de uma tarefa pode ocorrer em mais de um nível. Por exemplo, na Figura 11, a tarefa \odot foi primeiro detalhada numa tarefa \odot_1 e depois, num segundo nível de detalhe, \odot_1 foi detalhada nas tarefas $\odot_1^1, \dots, \odot_m^1$.⁴²

O detalhe de tarefas pode originar uma estrutura em árvore com a tarefa mãe original no nó de raiz, as outras tarefas não elementares nos restantes nós da árvore e as tarefas elementares nas folhas da árvore. As únicas tarefas a que pode afectar-se capacidade e escalonar e que são *realmente executáveis* são as tarefas elementares.

Há duas formas de detalhe de tarefa, a seguir descritas. Cada uma destas formas de detalhe, quando aplicada a uma tarefa, gera (mais) um nível de detalhe. As duas formas de detalhe de tarefas são:

- *Refinamento temporal* - Uma tarefa \odot é temporalmente refinada por *uma subtarefa* \odot_1 . Neste caso, \odot significa uma tarefa a ser executada num horizonte temporal $\langle t_s, t_e \rangle$. t_s^1 e t_e^1 serão os tempos de início e fim reais de execução da tarefa \odot , a não ser que \odot_1 seja posteriormente detalhada. O refinamento temporal é usado por razões de incerteza temporal. Por exemplo, no momento de criação da tarefa os tempos de início e fim da sua execução efectiva podem ser desconhecidos, mas ser conhecido um horizonte temporal dentro do qual ela deve ser executada e dentro do qual se reserva capacidade suficiente.
- *Decomposição* - Uma tarefa \odot é decomposta por *duas ou mais subtarefas* \odot_i . Neste caso, a tarefa mãe \odot deve ser executada (em geral de uma forma intermitente) durante os intervalos das subtarefas e deve ser $\min_i(t_s^i) = t_s$ e $\max_i(t_e^i) = t_e$. Os tempos t_s^i e t_e^i são os *tempos* de início e *tempos* de fim de execução efectiva de \odot , a não ser que \odot_i seja

⁴² Em geral, quando uma tarefa \odot_u é sucessivas vezes detalhada, usa-se a notação $\odot_z^{u,v,\dots,w}$ para indicar que a tarefa \odot_z é subtarefa da tarefa \odot_w , que por sua vez é subtarefa da tarefa ... \odot_v , que por sua vez é subtarefa da tarefa \odot_u . Os componentes da subtarefa \odot_z podem ser indicados, se necessário, com todos os índices de tarefas como superíndices, por exemplo, como em $e_s^{u,v,\dots,w,z}$ para indicar o evento de início da subtarefa \odot_z .

posteriormente detalhada. A decomposição de tarefas é usada principalmente por razões de capacidade. Por exemplo, quando não há capacidade disponível suficiente, continuamente entre t_s and t_e ,⁴³ ou quando um nível baixo de trabalhos-em-curso é preferido, ou quando a tarefa \bigcirc é coordenada com tarefas sucessoras ou antecessoras para permitir um menor tempo de fluxo.⁴⁴

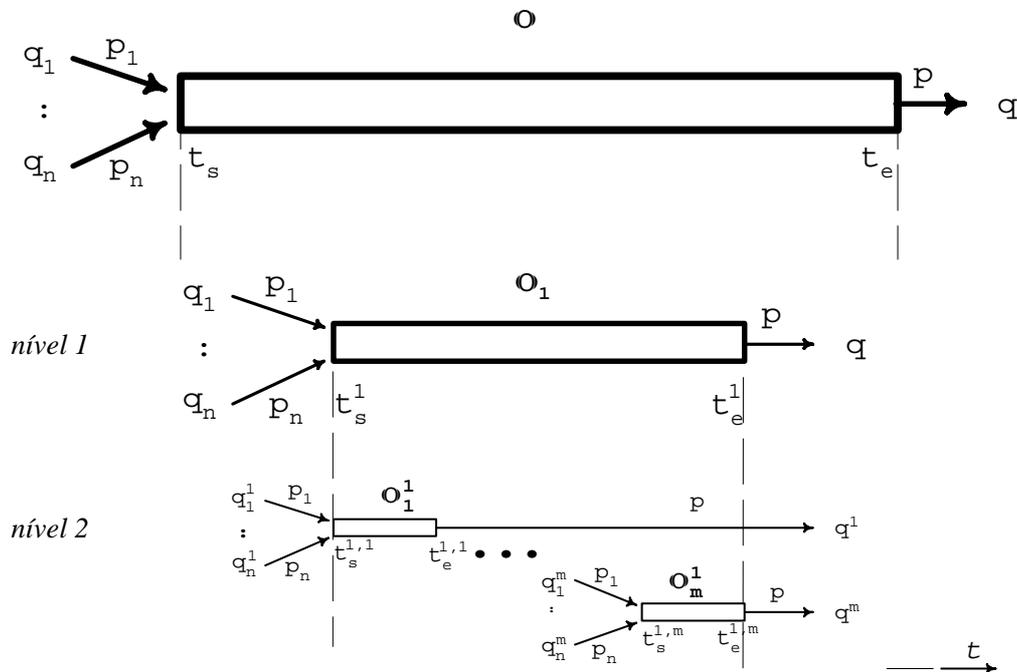


Figura 11- Exemplo de detalhe de tarefa (dois níveis).

A Figura 11 representa um exemplo de uma tarefa \bigcirc que foi sucessivamente detalhada, em dois níveis, com um refinamento temporal seguido de uma decomposição.

O detalhe de tarefas permite modelar fases diferentes de planeamento e escalonamento de tarefas e com granularidades temporais diferentes: o detalhe progressivo de uma tarefa permite que ela seja inicialmente planeada com alguma informação temporal incompleta⁴⁵ que vai sendo progressivamente conhecida até que, por fim, a tarefa poder ser escalonada sendo-lhe afectada capacidade do nó executor.⁴⁶ Isto permite usar os intervalos da tarefa a vários níveis de detalhe para, por exemplo, utilizar em raciocínio temporal (ver, por exemplo, [Koomen 1989]). A ideia do detalhe de tarefas é semelhante à das abstrações temporais por sumarização descritas em [Choueiry 1993] ou [Berry 1992] (embora no sentido inverso do da abstracção).

⁴³Claro que o total de capacidade disponível entre t_s e t_e deverá ser suficiente.

⁴⁴Isto é usualmente referido por subdivisão de lote, ou *lot-splitting* (ver, por exemplo, [Jacobs 1989] ou [Moily 1986]).

⁴⁵ Por exemplo, podem conhecer-se quantidades de produto de saída da tarefa e o tempo de fim planeado, ou data de entrega, mas desconhecer-se qual o intervalo, ou intervalos, em que a tarefa é escalonada e a capacidade do nó executante a ela afectada.

⁴⁶Permitir a modelação de tarefas em fases diferentes de planeamento e escalonamento (por meio do detalhe de tarefas) é uma característica saliente desta ontologia.

2.8 Fluxo

Um *fluxo* é uma ligação direccionada entre duas tarefas de uma rede de tarefas (ver adiante). Representa troca de um produto entre um par de tarefas e está associado a uma quantidade de um produto que é disponibilizado pela *tarefa fornecedora*, no final da sua execução, para ser consumido pela *tarefa cliente* num determinado instante. Fluxos são graficamente representados por setas ligando o par fornecedor-cliente de tarefas. Como exemplo representam-se na Figura 12 duas tarefas, \mathbb{O}_1 (fornecedora) e \mathbb{O}_2 (cliente), ligadas por um fluxo designado por $F_{1,2}$.

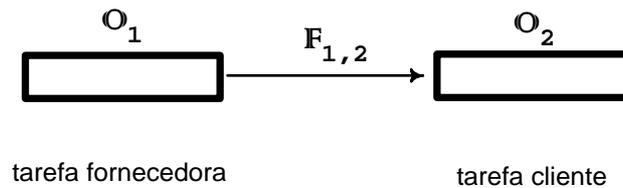


Figura 12- Fluxo entre duas tarefas \mathbb{O}_1 e \mathbb{O}_2 .

Formalmente, um fluxo ligando a tarefa \mathbb{O}_x à tarefa \mathbb{O}_y , designado por arco $F_{x,y}$, é descrito por um par da forma:

$\langle \mathbb{O}_x, \mathbb{O}_y \rangle$

Sendo:

- \mathbb{O}_x a tarefa fornecedora;
- \mathbb{O}_y a tarefa cliente;
- $p q_e^x \in p q_s^y$, isto é, existe um par produto-quantidade no conjunto de pares produto-quantidade do evento de início de \mathbb{O}_y que é igual ao par produto-quantidade do conjunto de pares produto-quantidade do evento de fim de \mathbb{O}_x .

Um fluxo entre uma tarefa fornecedora e uma tarefa cliente tem de corresponder a um arco de rede existente entre os dois nós executores afectados às tarefas e o produto trocado no fluxo tem de ser um elemento do conjunto de produtos desse arco (i.e., se aqueles nós forem v_x e v_y , tem de existir na rede um arco $E_{x,y} = \langle v_x, v_y, d \rangle$, tal que, sendo $p q_e^x = \langle p_e^x, q_e^x \rangle$, é $p_e^x \in d$).

Note-se que os fluxos que ligam as tarefas podem não corresponder (pelo menos sempre) exactamente às relações de precedência temporais que poderão graficamente sugerir. Se fosse esse o caso, a tarefa cliente deveria sempre iniciar-se após a tarefa fornecedora terminar. Ora isto pode não acontecer se as tarefas forem decompostas e se estiverem coordenadas de modo a tirar partido da subdivisão de lote (*lot-splitting*) para redução do tempo de fluxo total de ambas. Neste caso, a tarefa fornecedora pode terminar após a tarefa cliente se iniciar; *a priori* apenas se pode dizer então, que existe uma relação de precedência temporal entre os *eventos de início* de ambas as tarefas.

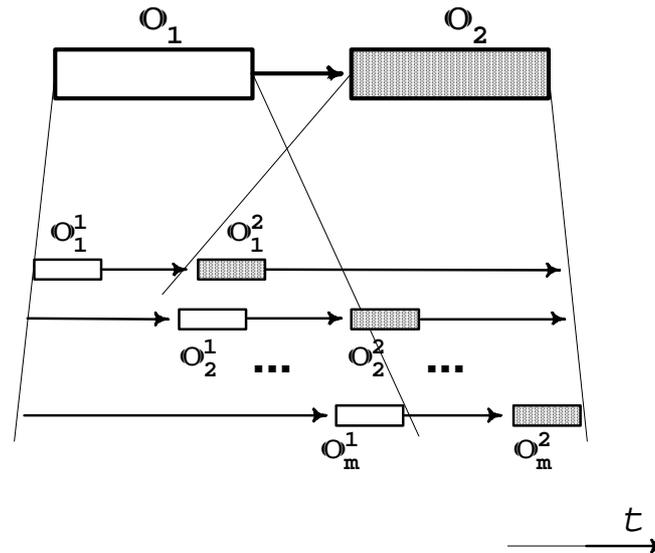


Figura 13- Fluxos e precedências entre tarefas.

Veja-se o exemplo da Figura 13, onde as tarefas O_1 e O_2 são decompostas em tarefas elementares $O_1^1, O_1^2, \dots, O_1^m$, e $O_2^1, O_2^2, \dots, O_2^m$, possibilitando o início da primeira subtarefa de O_2 (O_2^1) antes de a tarefa O_1 (isto é, antes de uma ou mais das últimas subtarefas de O_1) terminar. Só no caso de um fluxo entre tarefas elementares o fluxo corresponderá uma relação de precedência entre o evento de fim de uma tarefa fornecedora e o evento de início de uma tarefa cliente (correspondendo, então sim e para essas tarefas, às relações de precedência que os fluxos poderão sugerir).

2.9 Plano

Um *plano*, ou *rede de tarefas*, é um conjunto de tarefas ligadas por fluxos que produzem um único produto final. Ao construir um plano para obtenção de um produto nos nós terminais de uma rede, numa fase de construção embrionária o plano contém uma tarefa por cada nó da rede envolvido na obtenção do produto,⁴⁷ tendo associado o produto final a obter, a quantidade, e o tempo limite.⁴⁸ O plano é depois instanciado associando-se a cada uma das tarefas quantidades de produto à saída e tempos de início e fim planeados; ficam assim determinados eventos de início e fim para horizontes temporais das tarefas.⁴⁹ Numa fase posterior, o plano é detalhado por refinamento e/ou decomposição das tarefas, originando então, um plano pronto a ser executado, isto é, um *escalonamento* (ou programa, ou *schedule*).⁵⁰

Formalmente, um plano é descrito por um par da forma:

$\langle O, F \rangle$

Sendo:

⁴⁷ Tem portanto uma estrutura idêntica à da parte da rede envolvida na obtenção do produto.

⁴⁸ Ou data de entrega.

⁴⁹ No final desta fase as tarefas do plano são ditas *planeadas*.

⁵⁰ No final desta fase as tarefas do plano são ditas *escaloadas*.

$\mathcal{O} = \{ \dots, \mathcal{O}_z, \dots \}$ o conjunto de todas as tarefas do plano;

$\mathcal{F} = \{ \dots, F_{x,y}, \dots \}$ o conjunto de todos os fluxos entre as tarefas do plano.

Uma notação gráfica semelhante à que é usada para representar redes é usada para representar

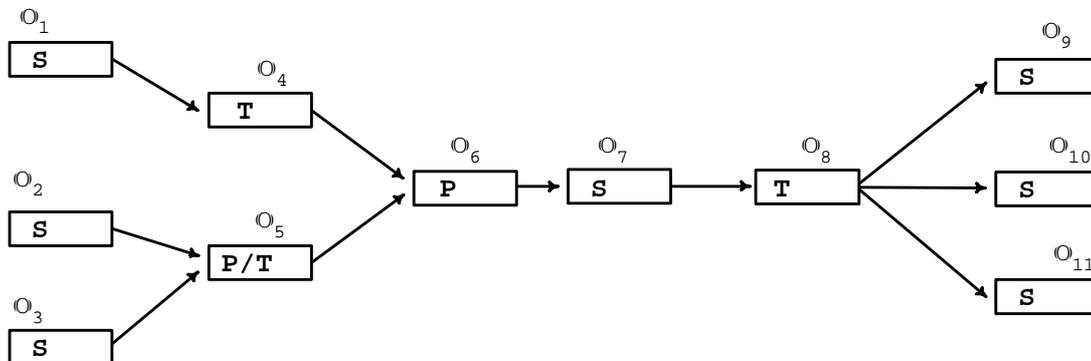


Figura 14- Um plano.

planos. Aqui, as tarefas são nós do grafo do plano e representam-se por barras, opcionalmente anotadas com os seus eventos extremos; os fluxos de produtos entre as tarefas são representados por arcos direccionados entre elas e que indicam ligações de tarefas clientes com tarefas fornecedoras. *Tarefas origem* e *tarefas terminais* são, respectivamente, as que não têm tarefas fornecedoras para algum produto de entrada, ou as que não têm tarefas clientes dentro da rede de tarefas do mesmo plano. A título de exemplo representa-se na Figura 14 um plano.⁵¹ As tarefas rotuladas de \mathcal{O}_1 , \mathcal{O}_2 e \mathcal{O}_3 são tarefas origem e as tarefas \mathcal{O}_9 , \mathcal{O}_{10} e \mathcal{O}_{11} tarefas terminais.

As restrições são constrangimentos sobre valores de eventos de tarefas. O problema do escalonamento das tarefas tem sido identificado como um exemplo de um *problema de satisfação de restrições*, em que se usam restrições e se aplicam técnicas de *propagação de restrições* (ver [Mackworth 1977], [Mackworth 1985], [Atabakhsh 1991], [Prosser 1991], [Kumar 1992]). Sobre as tarefas de um mesmo plano são impostas, de forma mais directa ou menos directa, restrições que se podem classificar nos grupos a seguir descritos.

2.9.1 Restrições de Continuidade

Este tipo de restrições constrange quantidades de produtos de tarefas de um mesmo plano.

2.9.1.1 Restrições de Continuidade Externas

Estas restrições exprimem a conservação das quantidades de produtos e dizem respeito aos fluxos entre pares de tarefas *fornecedor-cliente*. As restrições de continuidade externas impõem produção e consumo do mesmo *produto* nas mesmas *quantidades* nos extremos de cada fluxo. Existirá uma restrição de continuidade externa para cada produto trocado entre pares de tarefas fornecedor-cliente (para o mesmo produto). Este tipo de restrições podem ser descritas como se segue, analisando os fluxos de entrada e saída de uma tarefa genérica, \mathcal{O} .

⁵¹ Executável na rede da Figura 9.

Para cada produto de entrada, p_i , consumido pela tarefa \odot , sejam \odot_1, \dots, \odot_m todas as m tarefas fornecedoras da tarefa \odot para p_i num mesmo plano (ver Figura 15) e sejam q_i^1, \dots, q_i^m as quantidades fornecidas desse produto por \odot_1, \dots, \odot_m e q_i a quantidade consumida por \odot . Então, terá de ser $q_i^1 + \dots + q_i^m = q_i$. Isto quer dizer que os eventos de fim das tarefas \odot_k ($k=1, \dots, m$) e o evento de início de \odot serão da forma:

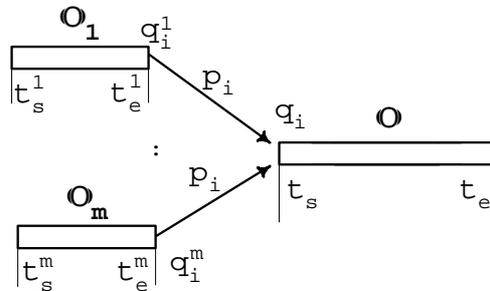


Figura 15- Restrições externas, com tarefas fornecedoras.

$$\langle \{ \langle p_i, q_i^k \rangle \}, t_e^k, v_k \rangle \quad (\text{para as tarefas } \odot_k)$$

$$\langle \{ \dots, \langle p, q_i \rangle, \dots \}, t_s, v \rangle \quad (\text{para a tarefa } \odot)$$

em que t_s e t_e^k designam os tempos de início e de fim, respectivamente das tarefas \odot e \odot_k , sendo:

$$\sum_{k=1}^m q_i^k = q_i$$

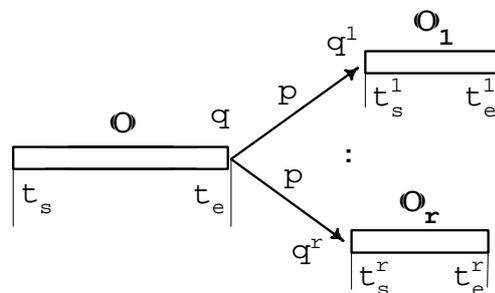


Figura 16- Restrições externas, com tarefas clientes.

Adicionalmente, para o produto de saída, p , produzido pela tarefa \odot , sejam \odot_1, \dots, \odot_r todas as r tarefas clientes da tarefa \odot para p num mesmo plano (ver Figura 16) e sejam q^1, \dots, q^r as quantidades de p fornecidas por \odot a \odot_1, \dots, \odot_r e q a quantidade fornecida por \odot . Então, terá de ser $q^1 + \dots + q^r = q$. Isto quer dizer que os eventos de início das tarefas \odot_j ($j=1, \dots, r$) e o evento de fim de \odot terão formas:

$$\langle \{ \dots, \langle p, q^j \rangle, \dots \}, t_s^j, v_j \rangle \quad (\text{para as tarefas } \odot_j)$$

$$\langle \{ \dots \langle p, q \rangle, \dots \}, t_e, v \rangle \quad (\text{para a tarefa } \odot)$$

em que t_e e t_s^j designam os tempos de fim e de início, respectivamente das tarefas \odot e \odot_j , sendo:

$$\sum_{j=1}^r q_j = q$$

2.9.1.2 Restrições de Continuidade Internas

Estas restrições exprimem também a conservação das quantidades de produtos e restringem *quantidades* do mesmo *produto*, produzido ou consumido, entre uma tarefa e as subtarefas correspondentes. Dizem, portanto, respeito, a tarefas detalhadas.

Todas as subtarefas produzem o mesmo produto de saída e consomem os mesmos produtos de entrada que a tarefa mãe correspondente. A quantidade do produto de saída da tarefa mãe é igual à soma das quantidades de produto de saída de cada subtarefa; a quantidade de cada produto de entrada da tarefa mãe é igual à soma das quantidades do mesmo produto de entrada de cada subtarefa. De um modo mais formal:

Seja uma tarefa \mathcal{O} , com n produtos de entrada, p_1, \dots, p_n , e um produto de saída p , detalhada em m tarefas elementares, $\mathcal{O}_1, \dots, \mathcal{O}_m$ (ver Figura 17). Para o caso de refinamento temporal será $m=1$. Se \mathcal{O} é descrita pelo par de eventos com a forma:

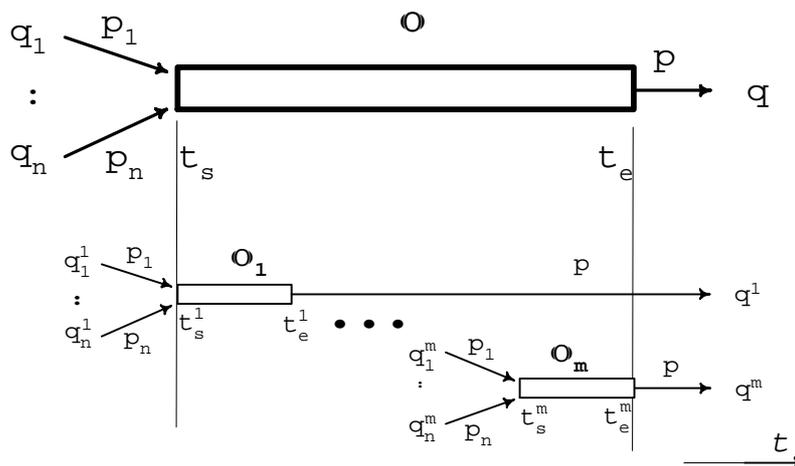


Figura 17- Detalhe de tarefas: restrições de continuidade e restrições temporais internas.

$\langle \langle p_1, q_1 \rangle, \dots, \langle p_n, q_n \rangle \rangle, t_s, v \rangle$ (evento de início)

$\langle \langle p, q \rangle \rangle, t_e, v \rangle$ (evento de fim)

Então cada tarefa elementar $\mathcal{O}_k, (k=1, \dots, m)$ é descrita pelo par de eventos:

$\langle \langle p_1, q_1^k \rangle, \dots, \langle p_n, q_n^k \rangle \rangle, t_s^k, v \rangle$ (eventos de início)

$\langle \langle p, q^k \rangle \rangle, t_e^k, v \rangle$ (eventos de fim)

tais que:

$$\sum_{k=1}^m q_i^k = q_i \quad (i=1, \dots, n) \text{ e}$$

$$\sum_{k=1}^m q^k = q$$

2.9.2 Restrições Temporais

As restrições temporais impõem precedência, ou ordenação temporal, dos eventos de início e fim de tarefas de um mesmo plano.

2.9.2.1 Restrições Temporais Externas

Estas restrições limitam a ordem temporal dos eventos das tarefas entre tarefas *fornecedor-cliente* (para o mesmo produto). Este tipo de restrições podem ser descritas como se segue, para uma tarefa genérica, \odot .

Sejam t_s e t_e os tempos de início e de fim de \odot , respectivamente, e t_s^1, \dots, t_s^m e t_e^1, \dots, t_e^m os tempos de início e de fim, respectivamente, de cada uma das m tarefas fornecedoras, \odot_1, \dots, \odot_m , da tarefa \odot num mesmo plano (ver Figura 15). Então, caso todas as tarefas sejam elementares, terá de ser $t_s \geq t_e^1, \dots, t_s \geq t_e^m$, ou numa forma mais compacta:

$$t_s \geq \max_{k=1, \dots, m} (t_e^k)$$

Se todas as tarefas forem não-elementares, à partida (sem saber como vão ser detalhadas) apenas se pode estabelecer que $t_s > t_s^1, \dots, t_s > t_s^m$ e $t_e > t_e^1, \dots, t_e > t_e^m$, isto é, poderá, ou não, haver sobreposição temporal de intervalos das tarefas fornecedoras com a tarefa cliente; em forma mais compacta isto pode ser expresso por:

$$t_s > \max_{k=1, \dots, m} (t_s^k) \quad e$$

$$t_s \leq \max_{k=1, \dots, m} (t_e^k) \quad e$$

$$t_e > \max_{k=1, \dots, m} (t_e^k)$$

Sejam t_s^1, \dots, t_s^r e t_e^1, \dots, t_e^r os tempos de início e de fim, respectivamente, de cada tarefa cliente da tarefa \odot no mesmo plano (ver Figura 16). Então, caso todas as tarefas sejam elementares, terá de ser $t_e \leq t_s^1, \dots, t_e \leq t_s^r$, ou numa forma mais compacta:

$$t_e \leq \min_{j=1, \dots, r} (t_s^j)$$

Se todas as tarefas forem não-elementares, à partida (sem saber como vão ser detalhadas) apenas se pode estabelecer que $t_s < t_s^1, \dots, t_s < t_s^r$ e $t_e < t_e^1, \dots, t_e < t_e^r$, isto é, em forma mais compacta:

$$t_s < \min_{j=1, \dots, r} (t_s^j) \quad e$$

$$t_e \geq \min_{j=1, \dots, r} (t_s^j) \quad e$$

$$t_e < \min_{j=1, \dots, r} (t_e^j)$$

2.9.2 Restrições Temporais Internas

Estas restrições limitam a ordem, ou os tempos, de eventos de tarefas e subtarefas correspondentes. Dizem respeito, portanto, a tarefas detalhadas.

Seja uma tarefa não elementar \odot , detalhada em m subtarefas, \odot_1, \dots, \odot_m (ver Figura 17). Para o caso de refinamento temporal será $m=1$. Sejam t_s e t_e respectivamente os tempos de início e de fim de \odot e sejam ainda t_s^1, \dots, t_s^m os tempos de início e t_e^1, \dots, t_e^m os tempos de fim de \odot_1, \dots, \odot_m , respectivamente. Então, em geral tem-se:

$$t_s^k \geq t_s \quad (k=1, \dots, m) \text{ e}$$

$$t_e^k \leq t_e \quad (k=1, \dots, m)$$

Tendo-se, no caso particular de decomposição:

$$\min_{k=1, \dots, m} (t_s^k) = t_s \quad \text{e}$$

$$\max_{k=1, \dots, m} (t_e^k) = t_e$$

2.9.3 Restrições de Capacidade

Restringem quantidades e durações das tarefas em função das capacidades (limitadas) de acumulação ou de processamento, usadas. As *restrições de capacidade* dos nós de uma rede fazem-se sentir sobre as tarefas dos planos restringindo-lhes tempos de início possíveis e durações, no caso dos processadores, e tempos de início possíveis e quantidades, no caso dos acumuladores. Por exemplo, para uma tarefa de processamento, fixando-se-lhe um tempo de início possível do ponto de vista do nó executante (quer dizer, existe capacidade suficiente para uma execução contínua e completa da tarefa a partir desse tempo) a duração aparece como um resultado da capacidade disponível do nó. Quanto maior a partilha (da capacidade) de um nó por mais tarefas elementares do mesmo tipo (de planos diferentes, ou do mesmo plano) menor a fracção de capacidade dele que está disponível para a execução de cada uma das tarefas e maior a duração delas. Já no caso da acumulação o que está limitado é a quantidade e não a duração da tarefa, podendo levar a uma decomposição da tarefa em subtarefas com quantidades menores (ou à escolha de um tempo de início diferente). Estas restrições, devido a serem inerentes aos nós, foram já descritas nas secções apropriadas.

3 Conclusão e Trabalho Futuro

O presente texto estabeleceu o conjunto de objectos e o vocabulário de base para um modelo de gestão integrada de redes de empresas ao nível operacional do escalonamento das operações. Só a parte respeitante aos *objectos físicos*, isto é, recursos físicos (nós de rede), fluxos físicos (de fluxos de produtos), etc., foi abordada, ficando estabelecidos apenas os objectos que tornam possível modelar um nível puramente operacional. Trabalho futuro terá de envolver:

- Realização computacional dos objectos físicos descritos. Esta realização deve permitir a criação de modelos computacionais do ambiente do escalonamento de tarefas no domínio da produção/distribuição.

- Descrição e formalização dos *objectos virtuais* — agentes e fluxos de informação. Isto completará a componente física com uma componente de decisão.
- Aspectos de representação dos objectos do modelo - recursos (nós, rede), planos, restrições - e do conhecimento heurístico - algoritmos, heurísticas -, arquitectura do sistema adequado a suportar o modelo de planeamento/escalonamento das operações. Aqui inclui-se a representação do tempo e aspectos de representação e raciocínio qualitativo e raciocínio baseado em restrições (ver [Weld 1990], [Bond 1988], [Williams 1990], [Kuipers 1994], [Allen 1983], [Allen 1991], [Vilain 1990], [Koomen 1989], [Beek 1992], [Beek 1991], [Prosser 1991], [Sadeh 1996] e [Sadeh 1994], por exemplo).

4 Referências

- AITEAR 1997a CIMI, 1997, *Final Report on Assessment of State-of-the-Art in Accurate Response*, Project AITEAR, CIMI/Cranfield University, Cranfield, Beds, MK43 0AL, UK, April 1997.
- AITEAR 1997b Benz, Harald, 1997, *Working Definition of EE and ARM for the AITEAR Project*, Discussion paper, AITEAR Project, FhG-IAO, Nobelstrasse 12, D 70569 Stuttgart, August 1997.
- Allen 1991 Allen, James F., 1991, *Time and Time Again: The Many Ways to Represent Time*, International Journal of Intelligent Systems, 6 1991
- Allen 1983 Allen, James F., 1983, *Maintaining Knowledge about Temporal Intervals*, Communications of the ACM 26 (11), 1983, 832-843
- Atabakhsh 1991 Atabakhsh, H., 1991, *A Survey of Constraint Based Scheduling Systems Using an Artificial Intelligence Approach*, Artificial Intelligence in Engineering, 6 (2) 1991
- Beck 1995 Beck, Howard; Tate, Austin, 1995, *Open Planning, Scheduling and Constraint Management Architectures for Virtual Manufacturing*, Artificial Intelligence Applications Institute, The University of Edinburgh (95-IMS1.PS, obtido na WWW).
- Beek 1992 Beek, Peter van, 1992, *Reasoning about Qualitative Temporal Information*, Artificial Intelligence 58 1992, 297-326
- Beek 1991 Beek, Peter van, 1991, *Approximation Algorithms for Temporal Reasoning*, IJCAI-91, 1291-1296, 1991.
- Berry 1992 Berry, Pauline M.; Choueiry, Berthe Y.; Friha, Lamia, 1992, *A Multi-Agent Architecture for a Distributed Approach to Resource Allocation Using Temporal Abstractions*, Technical report, EPFL No. TR-92/18, AI Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, EPFL-Ecublens, CH-1015 Lausanne, Switzerland (Web site <http://liawww.epfl.ch/>).
- Blazewicz 1994 Blazewicz, J.; Ecker, K.H.; Schmidt, G.; Weglarz, J., "Scheduling in Computer and Manufacturing Systems", Springer Verlag, 1994.
- Bond 1988 Bond, Alan H.; Les Gasser (eds.), 1988, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan Kaufman Publishers, Inc., San Mateo, California, 1988.
- Browne 1996 Browne, Jimmie; Harhen, John; Shivnan, James, 1996, *Production Management Systems*, Addison-Wesley, 1996 (2th edition).
- Carvalho 1996 Carvalho, J.M. Crespo de, 1996, *Logística*, Edições Sílabo, Lda., Lisboa, Portugal, 1996.
- Choueiry 1993 Choueiry, Berthe Y.; Faltings, Boi, 1993, *Interactive Resource Allocation by Problem Decomposition and Temporal Abstractions*, EWSP'93 - 2nd European Workshop on Planning, Vadstena, Sweden, December 1993.

- Christopher 1993 Christopher, Martin, 1993, *Logistics and Competitive Strategy*, in Cooper, James (Ed.), *Strategy Planning in Logistics in Transportation*, The Cranfield Management Research Series/Koogan Page Limited, London, 1993, Chapter 2, 24-32.
- Clark 1960 Clark, A; Scarf, H., 1960, *Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem*, *Management Science* 6(4) , 475-490, 1960.
- Coelho 1995 Coelho, Helder, 1995, *Inteligência Artificial Distribuída - Uma Introdução, (Distributed Artificial Intelligence - An Introduction)* Lecture Notes in the FCUL (Science School of the University of Lisbon), Helder Coelho, 1996, edition of the author.
- Fisher 1994 Fisher, Marshall R.; Hammond, Janice H.; Obermeyer, Walter R.; Raman, Ananth, 1994, *Making Supply Meet Demand*, *Harvard Business Review*, May-June 1994.
- Forrester 1958 Forrester, Jay W., 1958, *Industrial Dynamics a Major Breakthrough for Decision Makers*, *Harvard Business Review*, July-August 1958, 37-66.
- Fox 1988 Fox, Mark S., 1988, *An Organizational View of Distributed Systems*, Readings in Distributed Artificial Intelligence, Bond, Alan H.; Les Gasser (eds.), Morgan Kaufman Publishers, Inc., San Mateo, California, 1988.
- Fox 1989 Fox, Mark S.; Sadeh, Norman; Baykan, Can, 1989, *Constrained Heuristic Search*, *Proceedings of the 1989 International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI89)* 309-315, 1989.
- Fox 1993 Fox, Mark S.; Chionglo, John F.; Barbuceanu, Mihai, 1993, *The Integrated Supply Chain Management System*, Department of Industrial Engineering, University of Toronto, Canada (<http://www.ie.utoronto.ca/EIL/iscm-descr.html>).
- Gattorna 1996 Gattorna, J.L.; Walters, D.W., 1996, *Managing the Supply Chain*, Macmillan Business, 1996.
- Gruber 1993a Gruber, Thomas R., 1993, *What is an Ontology*, (from the Web site <http://ksl-web.stanford.edu/kst/what-is-an-ontology.html>).
- Gruber 1993b Gruber, Thomas R., 1993, *Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing*, Technical Report KSL 93-04, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, USA (from the Web site <http://ksl-web.stanford.edu/knowledge-sharing/papers/README.html#onto-design>).
- ICMAS 1996 ICMAS 1996, 1996, *Proceedings of the Second International Conference on Multi-Agent Systems (Contents)*, ICMAS-96, AAAI Press, Menlo Park, California, 1996.
- Jacobs 1989 Jacobs, F. Robert; Bragg, Daniel J., 1989, *Repetitive Lots: Flow-Time Reductions through Sequencing and Dynamic Batch Sizing*, *Decision Sciences*, Vol. 19, No. 2, 1989, 281-294.
- Kan 1976 Kan, A.H.G. Rinnooy, 1976, *Machine Scheduling Problems*,

- Martinus Nijhoff, The Hague, 1976
- Koomen 1989 Koomen, Johannes A.G.M., 1989, *Localizing Temporal Constraint Propagation*, KR-89, 198-202, 1989.
- Kuipers 1994 Kuipers, Benjamin, 1994, *Qualitative Reasoning, Modelling and Simulation with Incomplete Knowledge*, The MIT Press, 1994.
- Kumar 1992 Kumar, Vipin, 1992, *Algorithms for Constraint-Satisfaction Problems: A Survey*, AI Magazine, 13 (1) 1992
- Lee 1992 Lee, Hau L.; Billington, Corey, 1992, *Managing Supply Chain Inventory: Pitfalls and Opportunities*, Sloan Management Review, Spring 1992, pp. 65-73.
- Lee 1993 Lee, Hau L.; Billington, Corey, 1993, *Material Mangement in Decentralized Supply Chains*, Operations Research, Vol. 41, No. 5, September- October 1993, 835-847.
- Mackworth 1985 Mackworth, Alan K.;Freuder, Eugene C., 1985, *The Complexity of Some Polynomial Network Consistency Algorithms for Constraint Satisfaction Problems*, Artificial Intelligence, 25 1985, 65-74
- Mackworth 1977 Mackworth, Alan K., 1977, *Consistency in Networks of Relations*, Artificial Intelligence, 8 1977, 99-118
- Moily 1986 Moily, Jaya P., 1986, *Optimal and Heuristic Procedures for Component Lot-Splitting in Multi-Stage Manufacturing Systems*, Management Science, Vol. 32, No. 1, January 1986, 113-125.
- Morton 1993 Morton, Thomas E.; Pentico, David W., 1993, *Heuristic Scheduling Systems, with Applications to Production Systems and Project Management*, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Muckstadt 1993 Muckstadt, John A.; Roundy, Robin O., 1993, *Analysis of Multistage Production Systems*, In Handbooks in Operations Research and Management Science (Nemhauser, G.L.; Kan, A.H.G. Rinnooy, eds.), Volume 4: Logistics of Production and Inventory, Graves, S.C.; Kan, A.H.G. Rinnooy; Zipkin, P.H. (Eds.), North-Holland, Amsterdam, 1993,Ch.2,59-131.
- O'Neill 1996 O'Neill, H.; Sackett, P., 1996, *The Extended Enterprise Reference Framework, Balanced Automation Systems II*, Luís M. Camarinha-Matos and Hamideh Afsarmanesh (Eds.), 1996, Chapman & Hall, London, UK, pp 401-412
- O'Neill 1994 O'Neill, Henrique; Sackett, Peter, 1994, *The Extended Manufacturing Enterprise Paradigm*, Management Decision, 1994, 32(8), pp. 42-49.
- Parnell 1996 Parnell, Clay, 1996, *Supply Chain Management*, APICS - The Educational Society for Resource Management, 1996 (Obtido na WWW, <http://www.apics.org/SIGs/Articles/supply.htm>).
- Prosser 1991 Prosser, Patrick, 1991, *Hybrid Algorithms for the Constraint Satisfaction Problem*, Technical Report AISL-46-91, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK, September 1991

- Rabelo 1996 Rabelo, R.J.; Camarinha-Matos, L.M., 1996, *Towards Agile Scheduling in Extended Enterprise*, Balanced Automation Systems II, Luís M. Camarinha-Matos and Hamideh Afsarmanesh (Eds.), 1996, Chapman & Hall, London, UK, pp 413-422
- Rich 1991 Rich, Elaine; Knight, Kevin, 1991, *Artificial Intelligence*, McGraw-Hill, 1991.
- Ross 1996 Ross, David F., 1996, *Designing an Effective Quick Response System*, APICS - The Educational Society for Resource Management, 1996 (from the Web site <http://www.apics.org/SIGs/Articles/designin.htm>).
- Russell 1995 Russell, Stuart; Norvig, Peter, 1995, *Artificial Intelligence, A Modern Approach*, Prentice Hall, 1995.
- Sackett 1994 Sackett, P.; Wortmann, H.; Brown, J., 1994, *Manufacturing Business Challenges in the late 1990's*, Proc. 1st. SCMA Conference on Outstanding Business Success in Manufacturing, London.
- Sadeh 1994 Sadeh, Norman, 1994, *Micro-Oportunistic Scheduling: The Micro-Boss Factory Scheduler*, Intelligent Scheduling, Morgan Kaufman, 1994, Cap. 4
- Sadeh 1996 Sadeh, Norman M.; Hildum, David W.; Laliberty, Thomas J.; Smith, Stephen F.; McAnulty, John; Kjenstad, Dag, 1996, *An Integrated Process-Planning/Production-Scheduling Shell for Agile Manufacturing*, Technical Report CMU-RI-TR-96-10, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania 15213, May, 1996 (CMRI9610.PS, Obtido na WWW).
- Scott 1991 Scott, Charles; Westbrook, Roy, 1991, *New Strategic Tools for Supply Chain Management*, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 21, No. 1, 1991, 23-33.
- Sycara 1991 Sycara, Katia; Roth, Steve; Sadeh, Norman; Fox, Mark, 1991, *Distributed Constrained Heuristic Search*, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. 21, No.6, November/December 1991, 1446-1461.
- Thomas 1996 Thomas, Douglas J.; Griffin, Paul M., 1996, *Coordinated Supply Chain Management*, European Journal of Operational Research, 94 (1996) 1-15.
- Vilain 1990 Vilain, Marc; Kautz, Henry; Beek, Peter van, 1990, *Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning: A Revised Report*, Qualitative Reasoning about Physical Systems, Morgan Kaufman Publishers, Inc., San Mateo, California, 1990, 373-381.
- Weld 1990 Weld, Daniel S.; Kleer, Johan de (Eds.), 1990, *Qualitative Reasoning about Physical Systems*, Qualitative Reasoning about Physical Systems, Morgan Kaufman Publishers, Inc., San Mateo, California, 1990.
- Williams 1990 Williams, Brian C., 1990, *Doing Time: Putting Qualitative Reasoning on Firmer Ground*, Qualitative Reasoning about Physical Systems,

- Morgan Kaufman Publishers, Inc., San Mateo, California, 1990, 353-360; Proceedings of AAAI-86, 105-112.
- Williams 1981 Williams, Jack F., 1981, *Heuristic Techniques for Simultaneous Scheduling of Production and Distribution in Multi-Echelon Structures: Theory and Empirical Comparisons*, Management Science, Vol. 27, No. 3, March 1981, 336-352.
- Williams 1983 Williams, Jack F., 1983, *A Hybrid Algorithm for Simultaneous Scheduling of Production and Distribution in Multi-Echelon Structures*, Management Science, Vol. 29, No. 1, January 1983, 77-92.
- Yokoo 1990 Yokoo, Makoto; Ishida, Toru; Kuwabara, K., 1990, *Distributed Constraint Satisfaction for DAI Problems*, Proceedings of the 10th International Workshop on DAI, 1990.
- Yokoo 1991 Yokoo, Makoto; Durfee, Edmund H., 1991, *Distributed Constraint Optimization as a Formal Model of Partially Adversarial Cooperation*, Technical Report CSE-TR-101-91, Department of Electrical Engineering and Computer Science, The University of Michigan, Ann Arbor, USA.
- Zweben 1994a Zweben, Monte;Fox, Mark, 1994, *Intelligent Scheduling*, Morgan Kaufman, 1994, ISBN 1-55860-260-7
- Zweben 1994b Zweben, Monte;Daun, Brian;Davis, Eugene;Deale, Michael, 1994, *Scheduling and Rescheduling with Iterative Repair*, in *Intelligent Scheduling*, Morgan Kaufman, 1994, Cap. 8