

CONTROLE DE PROCESSOS LOGÍSTICOS BASEADO EM AGENTES INTELIGENTES AUTÔNOMOS

Dmontier Pinheiro Aragão Jr.

Antônio Galvão N. Novaes

Enzo Morosini Frazzon

Mônica Maria Mendes Luna

Universidade Federal de Santa Catarina

Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas

RESUMO

Este artigo apresenta uma proposta para o controle de processos logísticos de modo distribuído numa cadeia de suprimentos, sugerindo para isto um modelo estruturado em agentes autônomos capazes de atuar de modo coordenado para reduzir os custos de uma cadeia de suprimentos. O artigo inicia-se com uma revisão bibliográfica sobre os temas: teoria de agentes e agentes aplicados a cadeias de suprimentos. O modelo proposto se aplica a cadeia de suprimento global, onde custos de transporte e ganhos de escala são decisivos para a tomada de decisões no planejamento da produção e do transporte.

ABSTRACT

This paper presents a proposal for the control of logistic processes in a distributed way for a supply chain, for that is suggested a structured model of autonomous agents to act in a coordinated way to reduce the costs. This article begins with a literature review on the subjects: theory of agents and agents applied to supply chains. The scene for the model is a global supply chain, where transportation costs and economies of scale are crucial for decision-making in production planning and transportation.

PALAVRAS CHAVE: Agentes Autônomos; Cadeias globais de suprimentos; Logística dinâmica.

1. INTRODUÇÃO

No ambiente globalizado atual é comum que a fonte de matéria prima, a produção e o consumo estejam localizados em países e continentes diferentes. Neste contexto, pode-se definir uma cadeia de suprimento global como uma rede de fornecedores, fábricas, e subcontratantes, armazéns, centros de distribuição e varejistas que adquirem matérias primas, transformam, produzem e vendem a seus clientes (Fox *et al.*, 2000). O fluxo de mercadorias ao longo destas cadeias ganha complexidade, e por conta disso o planejamento e a execução das operações logísticas de transporte e armazenagem apresentam grandes desafios (Lang *et al.*, 2008). Para lidar com este problema, vêm ganhando espaço uma nova geração de estratégias para o controle de processos logísticos baseadas em agentes inteligentes autônomos (Bullinger *et al.*, 2000 apud ; Jiao *et al.*, 2006).

Neste contexto, o presente artigo faz uso de uma metodologia teórico-conceitual (Berto e Nakano, 2000), propondo um modelo de controle autônomo de processos logísticos baseado em agentes inteligentes para cadeias globais de suprimentos. O artigo formaliza a utilização de agentes distribuídos para a realização de um planejamento integrado da produção e do transporte. Tal planejamento é materializado em uma programação para a produção e o transporte de produtos e matérias primas para cada empresa participante de uma cadeia de suprimentos global. Através de uma ampla fundamentação teórica este artigo ressalta o impacto de agentes autônomos no planejamento e execução das complexas atividades de gerenciamento em uma cadeia de suprimentos global.

O artigo inicia-se com a apresentação das bases teóricas, apresentando na seção 2 a fundamentação teórica que norteou o presente estudo. Nesta seção são destacados conceitos fundamentais para a compreensão do que são agentes e apresentadas as características dos estudos cujo enfoque esteja centrado na logística e nas cadeias de suprimentos. Constatou-se que o uso de agentes na coordenação logística é uma área de estudo proeminente. A seção 3 inicia com a apresentação do cenário da aplicação do modelo teórico baseado em agentes distribuídos, isto é, as cadeias globais de suprimentos. Na sequência, o modelo é formalizado matematicamente. É importante destacar que o modelo proposto é uma reformulação do modelo de (Lau et al., 2006). Finalizando, na seção 4 são apresentadas as conclusões e recomendações finais, destacando as principais contribuições.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica tomou como base inicial obras dedicadas à revisão bibliográfica na área de agentes aplicados à logística (Lang *et al.*, 2008; Moyaux *et al.*, 2006). Na sequência, foi realizada uma pesquisa nos portais de pesquisa científica “Science Direct” e “Web of Science”. O primeiro é uma vasta base de periódicos e livros mantidos pela Elsevier, permitindo a consulta aos artigos de mais de 2.500 periódicos, além de outras publicações. Já o segundo é uma base online de indexação de referências científicas, mantida pela Thomson Reuters, provê acesso a aproximadamente 10.000 periódicos de alto impacto e mais de 110.000 anais de conferências. As ferramentas de busca foram escolhidas por possuírem avançados recursos de busca que permitissem a pesquisa por diferentes palavras-chave, e em diferentes partes dos artigos, como: título, autores, palavras-chave, resumo, corpo do artigo, dentre outros critérios.

A escolha dos termos para a pesquisa procurou avaliar os seguintes critérios: amplitude da aplicação, tipo de coordenação e abordagem utilizada. Os termos foram pesquisados nos seguintes campos: título, palavras-chave e resumo. Especificamente, o critério “amplitude da aplicação” identificou se o problema abordado está relacionado mais especificamente com os transportes, ou se observa toda a cadeia de suprimento, incluindo outras atividades como a de armazenamento e produção. Os termos utilizados na busca foram “*transports*” e “*supply chain*”). O critério “tipo de coordenação” procurou observar se a proposta está relacionada com o processo logístico de modo amplo, ou se está preocupado com o problema da automação (utilizaram-se os termos “*autonomous*” e “*logistics process*”). E, por último, com relação à “abordagem utilizada”, buscou-se restringir os resultados ao foco da pesquisa solicitando assim os termos que são mais frequentemente utilizados na literatura para descrever modelos de agentes (fez-se uso dos termos “*agent-based*” e “*agents*”).

Os resultados quantitativos podem ser identificados na Figura 1, onde foram encontradas durante a pesquisa 157 referências, pode ser verificado que os estudos sobre o uso de agentes na logística abordam geralmente cadeias de suprimentos e não apenas o processo de transporte; outra observação é a recorrência da automação, a maioria das aplicações faz algum tipo de menção a este fato.

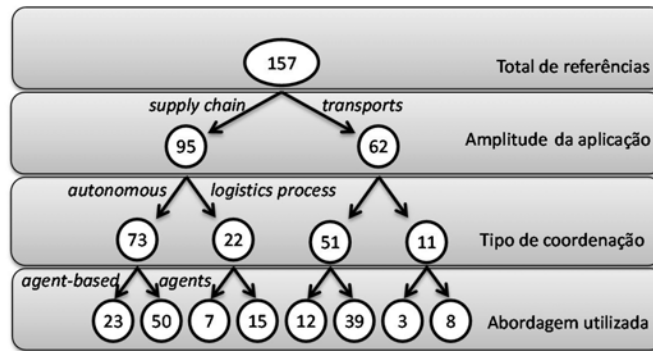


Figura 1: Número de referências encontradas

Após a eliminação das referências duplicadas, foram listadas 80 referências, sendo que destas, 61 foram publicadas nos últimos 7 (sete) anos, o que revela que o estudo da aplicação de agentes na logística recentemente tem obtido visibilidade na comunidade acadêmica. Os *abstracts* de 80 artigos foram analisados de forma a identificar àqueles que seriam relevantes para esta pesquisa, isto é, que abordassem o tema de controle autônomo de processos logísticos baseados em agentes inteligentes. Após esta etapa, foram eliminados os artigos que não abordassem a automação e que não estivessem relacionados com os transportes ou com a cadeia de suprimento como um todo. Chegou-se a um conjunto de 18 referências para a fundamentação deste trabalho. Complementarmente, referências que forneceram a base teórica a estes artigos também foram consultadas e analisadas a fim de expandir a conceituação sobre o tema.

2.1. Teoria acerca de Agentes

A teoria dos agentes é um campo da ciência da computação, mais especificamente na área de inteligência artificial. A definição do termo agente é bastante disputada, sendo que ainda não há um consenso quanto a um conceito formal. Parunak (1998) define um agente como uma entidade de *software* que possui informação e programação encapsulada, garantindo ao agente a habilidade de reagir autonomamente para atingir a seus objetivos. Já para Fox *et al.* (2000), agente é um *software* autônomo com objetivo determinado que opera assincronamente, comunicando-se de modo coordenando com outros agentes quando necessário. Por sua vez, Wooldridge (2002) define agentes como *softwares* capazes de ter ações independentes de acordo com interesse de seu usuário ou próprio. Há ainda a definição de Henoch e Ulrich (2000) que definem agentes como entidades de *software* que são dedicadas a um propósito específico e executam um conjunto específico de operações com a finalidade de realizar tarefas. Pode-se perceber que apesar de existirem diferentes visões do conceito de agentes, existe um denominador comum que define agente como uma entidade de software que tem um propósito específico.

Conforme observado na Figura 2, Nwana (1996) classificou agentes de acordo com as características de: cooperação (se utiliza outros agentes para executar determinada atividade), aprendizado (se utiliza o histórico para decidir sobre como executar determinada atividade) ou autonomia (age sem aguardar decisão de outro agente ou ser humano). Utilizando uma combinação destes conceitos, podem-se definir agentes de aprendizado colaborativo que devem ter cooperação e aprendizado, mas não necessariamente devem ser autônomos. Desta forma em diante estão apresentados agentes colaborativos (sem aprendizado), agentes de comunicação (sem cooperação), e agentes inteligentes (que possuem todas as três

características).

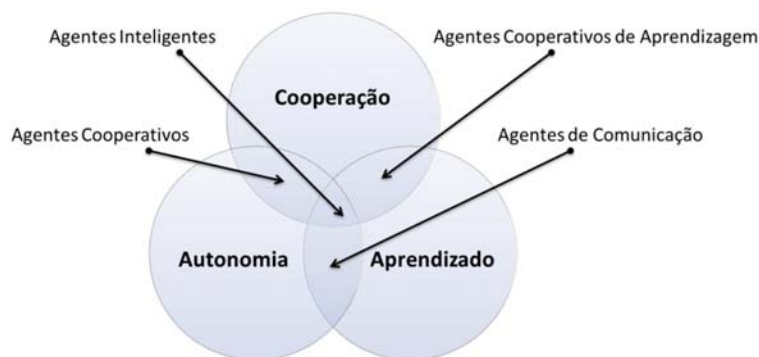


Figura 2: Tipologia de agentes (adaptado de Nwana, 1996)

A utilização de agentes no transporte pode ser organizada de acordo com duas finalidades principais: sistemas de suporte a decisão (*Decision-Support System*, DSS) e sistemas de automação. Segundo a ótica da coordenação, cada proposta de utilização dos agentes pode ser classificada quanto ao controle: centralizado e descentralizado; quanto a estrutura: estática ou dinâmica; e quanto a atitude: cooperação, competição, ou ambos (Davidsson *et al.*, 2005).

Parunak (2000) propôs uma medição do grau de maturidade de aplicações baseadas em agentes, em grau crescente de maturidade, classificando as aplicações de agentes em: propostas conceituais, simulações em ambiente computacional, prototipação através de hardware e software adequados, fase de testes em ambiente comercial ou em estudos de caso, sendo utilizada por alguma empresa no mercado, e comercialização, onde a aplicação desenvolvida é robusta o suficiente para ser utilizada por outros clientes.

Outra tendência emergente é o conceito de sistemas multiagentes. Estes sistemas distribuem o poder decisório entre agentes de modo a se tornarem mais assertivos em suas decisões, bem como compartilhando o custo computacional da tomada de decisão (Wooldridge, 2002). Estes sistemas multiagentes são naturalmente distribuídos. Apesar de estes sistemas serem geralmente menos eficientes que soluções centralizadas (pois a tomada de decisão normalmente é realizada sem o conhecimento completo das informações disponíveis), sua implementação é mais viável, visto que a informação está dispersa na rede. Aplicações distribuídas têm ainda a vantagem de atender a aplicações com as seguintes características: geograficamente distribuídas, muitos componentes interagindo, grande conteúdo informacional, e largo escopo de cobertura no domínio (Huhns e Stephens, 1999).

2.2. Sistemas baseados em agentes aplicados em cadeias de suprimentos

O papel da informação no gerenciamento da cadeia de suprimento envolvendo processos interorganizações tem crescido em importância, a evolução dos sistemas de informação podem ser classificados em 4 (quatro) níveis: sistemas isolados, sistemas com integrados mas em organizações isoladas, informação como um recurso corporativo, e informação disponível em todo lugar (Lang *et al.*, 2008). De modo semelhante, Novaes (2007) observa que o desenvolvimento da logística aconteceu de acordo com o tipo de integração (o autor chamou de Evolução Integrativa) classificando o nível de integração em: segmentada (grande preocupação da redução dos custos logísticos, mesmo em detrimento do restante da cadeia de suprimento), rígida (as empresas atentaram para a otimização e planejamento da logística,

mas de modo rígido), flexível (caracterizada pela integração dinâmica e flexível entre agentes na cadeia de suprimento), e estratégica (as empresas passam a utilizar logística de modo estratégico dentro da cadeia de suprimentos). Na Figura 3, é apresentado um relacionamento entre duas classificações apresentadas, realizando um paralelo com algumas tecnologias que seriam chave para cada nível de evolução, isto permite visualizar como as tecnologias avançaram em direção às necessidades logísticas em diferentes épocas.



Figura 3: Relacionamento entre a evolução da logística e dos sistemas de informação

De acordo com Sodhi (2001), os processos empresariais relativos ao gerenciamento da cadeia de suprimento podem ser classificados de acordo com o horizonte de tempo para planejamento, sugerindo os níveis: estratégico, tático, operacional e imediato (ver Tabela 1).

Tabela 1: Processos e oportunidades de acordo com o horizonte de tempo (Sodhi, 2001)

Horizonte de tempo	Processos Empresariais	Oportunidades
Estratégico	Custos de construção e de propriedade Atendimento da demanda (global) Aquisição dos recursos (global) Fusões e aquisições	Determinação de que plantas, centros de distribuição, e caminhos serão abertos ou fechados.
Tático	Serviço ao cliente Inventário Custos da cadeia de suprimento	Planejamento de compras, produção e transportes para minimizar custos na cadeia de suprimento.
Operacional	Serviço ao cliente Utilização dos equipamentos Custos de transportes	Criação e modificação de planos de produção, melhorar a gestão de estoques de produtos acabados e minimização dos custos de transportes
Imediato	Execução do planejado	Tentativas de reprogramação online da produção para atender as datas das ordens de requisição. Reconfiguração dos pedidos para atender as datas requeridas.

Uma nova tendência para a distribuição das decisões no nível de uma cadeia global de suprimentos tem resultado no desenvolvimento de sistemas de planejamento baseados em agentes (Forget *et al.*, 2008). Esta tecnologia tem sido apontada como apropriada para a implantação de uma logística autônoma (Schuldt, 2010; Lau *et al.*, 2006). A forma centralizada de gestão de cadeias de suprimentos ocasiona um aumento significativo da

complexidade pelo crescente número de: transações, objetos diferenciados, entidades envolvidas, e processos distribuídos. Em um mercado cada vez mais dinâmico, todo esse complexo sistema precisa ser continuamente monitorado, de modo a se conseguir observar oportunidades de melhorias de sua eficiência (Julka *et al.*, 2002). Sistemas distribuídos baseados em agentes são mais apropriados para atender aos mercados cada vez mais dinâmicos, pois não dependem de recursos computacionais de apenas uma entidade, mas utilizam os recursos computacionais disponíveis que estão localizados nos nós da rede.

Foi verificado que os agentes podem representar tanto processos (planejamento, compra, despacho, etc), como objetos físicos a que gerenciam (carga, veículos, máquinas, etc). Estes agentes são executados nas diferentes indústrias, operadores logísticos relacionados; ou mesmo esses agentes podem estar em computadores embarcados em veículos ou cargas, a Tabela 2 detalha as entidades normalmente relacionadas com as cadeias de suprimentos e as relaciona com os autores que as referenciaram.

Tabela 2: Agentes comumente citados na literatura

Agente	Local	Referência
Planejamento	Indústria	(Jiao <i>et al.</i> , 2006; Fox <i>et al.</i> , 2000; Nilsson e Darley, 2006; Lau <i>et al.</i> , 2006)
Compra de matéria prima	Indústria	(Jiao <i>et al.</i> , 2006; Fox <i>et al.</i> , 2000; Chai <i>et al.</i> , 2010; Lau <i>et al.</i> , 2006)
Produção ou <i>Schedulling</i>	Indústria	(Jiao <i>et al.</i> , 2006; Fox <i>et al.</i> , 2000; Chai <i>et al.</i> , 2010)
Despacho	Indústria	(Jiao <i>et al.</i> , 2006; Fox <i>et al.</i> , 2000)
Configuração	Indústria	(Jiao <i>et al.</i> , 2006; Fox <i>et al.</i> , 2000)
Aquisição	Varejista	(Jiao <i>et al.</i> , 2006; Lau <i>et al.</i> , 2006; Fox <i>et al.</i> , 2000; Nilsson e Darley, 2006; Chai <i>et al.</i> , 2010)
Transporte	Operador	(Fox <i>et al.</i> , 2000; Schuldt, 2010)
Armazém	Operador	(Fox <i>et al.</i> , 2000; Schuldt, 2010)
Recursos ou <i>Resources</i>	Carga/Veículo	(Schuldt, 2010; Nilsson e Darley, 2006)
Máquinas	Indústria	(Nilsson e Darley, 2006)

Com base na fundamentação teórica, um modelo de controle autônomo de processos logísticos por agentes inteligentes será proposto na seção 3.

3. MODELO DE CONTROLE DE PROCESSOS LOGÍSTICOS POR AGENTES INTELIGENTES AUTONOMOS

Esta proposta, a ser descrita a seguir, atua nos processos intrinsecamente operacionais de uma cadeia de suprimento, construindo e mantendo de modo autônomo um agendamento dos transportes utilizados e das ordens de compras. O modelo é aplicado às cadeias de suprimentos globais que necessitem vencer grandes distâncias para transportar os produtos ou matérias primas do mercado produtor para o mercado consumidor. Existindo assim grandes distâncias geográficas e custos significativos de armazenagem, o transporte de mercadorias entre continentes normalmente é efetuado sobre o modal marítimo e a periodicidade não é elevada. Segundo a escala de maturidade proposta por Parunak (2000), este trabalho se enquadra como um modelo conceitual.

3.1. Estabelecimento do cenário de teste para o modelo

O fluxo de abastecimento estudado (Figura 4) ilustra uma situação empresarial que serviu de base para este artigo, onde uma empresa possui o mercado consumidor no Brasil, mas comercializa produtos produzidos em outros países, como a China por exemplo. O cenário é definido por uma empresa que atua com foco em um país específico, sendo neste país onde está localizado seu principal armazém (A_0). Define-se o país C_a onde uma operação produtiva a deve ser realizada. A cadeia de suprimentos tem redes de empresas em cada país, podendo existir um armazém utilizado para consolidação de cargas, antes destas serem enviadas a outros países.

A decisão de existir ou não um armazém de consolidação num país depende do volume de compras daquele país. Cada empresa produtora m possui seu próprio estoque interno para sua produção, enquanto não há um volume de compras no país que justifique um armazém de consolidação, o custo de estoque dos produtos fica por conta de cada produtor, isto é, embutido no custo de produção, encarecendo o custo produtivo daquele país. Quando existe o estoque de consolidação, a produção realizada é enviada diretamente para este armazém intermediário da empresa importadora. O mercado consumidor da empresa está localizado apenas em seu país de origem, sendo composto de alguns postos de venda, a demanda destes postos é dita pelo mercado, mas pode ser orientada por consultoria oferecida pela empresa (uma prática conhecida em franquias e representações de produtos com alto valor agregado).

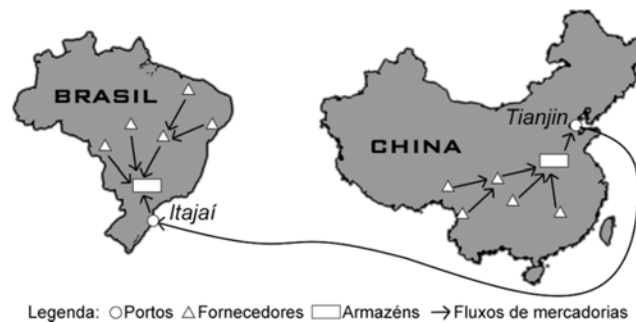


Figura 4: Exemplo de fluxo de abastecimento a ser modelado

Os agentes a serem modelados nessa proposta são: Fornecedores, Varejistas, Armazéns e Transportadores. Conforme pode ser visto através do diagrama de classes (Figura 5) da linguagem UML (Unified Modelling Language – linguagem apropriada para a modelagem de objetos) ilustra como esses agentes estão relacionados uns aos outros. Serão propostas 3 (três) interfaces para as demais classes da proposta (agenteInt, entidadesInt, operadoresInt), as classes que implementarão tais interfaces e poderão ser instanciadas dentro do sistema distribuído proposto serão as classes Fornecedores (capacidade de oferta disponível, tipos de produtos produzidos, quantidade estocada dos produtos), Varejistas (demanda necessária, tipos de produtos requeridos, quantidade em estoque dos produtos, nível ideal de estoque dos produtos), Armazéns (custo fixo para armazenagem, quantidade máxima de produtos, custo variável por produto), e Transportadores (países em que opera, modos de transporte em que opera, tempos e custos de transporte para os trechos em que opera para cada modo).

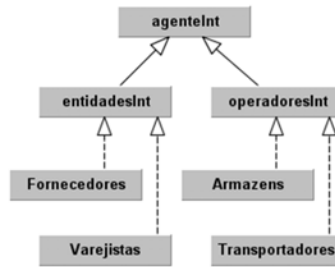


Figura 5: Diagrama de classes UML dos agentes propostos

Para a coordenação das interações entre os agentes, é sugerida a utilização de um protocolo que gerencie as interações numa rede de interações, um protocolo que ganhou notoriedade nos últimos anos foi o FIPA, proposto pela fundação que mantém o protocolo (FIPA, 2011), esse tem se tornado um padrão para a modelagem da comunicação entre agentes, mas ele não é o único padrão existente para agentes, outros esforços já têm sido feito no sentido de criar padrões para lidar com agentes.

3.2. Definição do modelo

O modelo sugerido neste artigo é uma evolução do modelo proposto por Lau *et al.* (2006), estes autores propuseram que a cadeia de suprimento fosse gerenciada de modo distribuído por $n \subset N$ empresas de planejamento (ditam a realização das operações e os transportadoras necessários) e por $m \subset M$ empresas produtivas (as indústrias finais ou intermediárias da cadeia de suprimento). Neste artigo, o modelo será estendido para observar o impacto dos custos de armazenagem ao longo da cadeia global de suprimentos. Cada empresa produtiva m do modelo possui uma demanda por algum tipo de produto, não importando se é num estágio final ou intermediário da produção, e que após algum tipo de atividade realizada enviam produtos para adiante na cadeia de suprimento. O horizonte de tempo para o planejamento é T com um índice de ciclo t variando de 1 até T . A granularidade do tempo pode ser adequada de acordo com o interesse de quem necessita aplicar o modelo, podendo representar minutos, horas, dias ou outro maior.

Um pedido pode ser representado por um grafo $P := \langle J, E \rangle$, onde J é um conjunto de operações (nós) em um projeto e E é um conjunto de arcos. Um arco pode ser representado por $(i, j) \in E$, e traz o significado de que a operação i precede a operação j .

A informação de um pedido P que está sendo controlado por um transportador n pode ser descrito por J_n e E_n . O pedido deve ser completo antes do prazo D_n que é dado pelo cliente do projeto. Cada operação i pode ser iniciada apenas após um tempo de espera conhecido rp_i , este prazo pode representar o tempo necessário para a realização de procedimentos transacionais ou mesmo o tempo para a resolução de questões financeiras. A operação i também deve atender aos requisitos da empresa produtiva que define o tempo de *setup* necessário para iniciar a operação.

O conjunto de empresas que estão aptas para a realização de uma operação i é definida por AC_i . A capacidade de cada empresa m num período t é definida por CP_{mt} , sendo que a empresa pode executar mais de uma operação ao mesmo tempo. Informações como tempo de processamento, demanda por recursos e custo para a execução de uma operação i podem ser

definidos respectivamente por l_{im} , q_{im} , e c_{im} . Já o tempo de entrega, o custo de transporte, e o custo de transporte em escala do produto obtido com a operação i realizada da empresa h para a empresa k ; podem ser vistos como lt_{ihk} , lc_{ihk} e lc'_{ihk} . Os ganhos de escala no transporte acontecem quando a mercadoria é direcionada primeiramente a um armazém para após isso ser enviada ao destino, que sempre será outro armazém no caso de viagens entre regiões mais distantes.

Um planejamento da produção para toda a cadeia de suprimento pode ser definida como: $S := \{S_1, \dots, S_n\}$. Um planejamento para uma empresa n pode ser definido por $S_n := \langle X_n, Z_n \rangle$. Sendo que X_n representa um vetor com os tempos de início das operações e $Z_n = \{Z_{im}\}$ representa a seleção de empresas para a operação. Todo o planejamento para esta empresa n também deve atender ao limite estipulado pela própria empresa D_n .

A formulação matemática pode ser vista como segue abaixo:

$$\min(FO) = \sum_{n \in N} \left[\sum_{i \in J_n} \left(\sum_{m \in AC_i} Z_{im} c_{im} \right) + CJS\mathcal{A} + \min(CES\mathcal{A}, CEC\mathcal{A}) \right] \quad (1)$$

sujeito a,

$$X_i + \sum_{m \in AC_i} Z_{im} l_{im} + \sum_{h \in AC_i, k \in AC_j} Z_{ih} Z_{jk} lt_{ihk} \leq X_j \\ \forall n \in N, \forall i, j \in J_n, \forall (i, j) \in E_n \quad (2)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{i \in J_n} \sum_{X_i \in [t-l_{im}+1, t]} q_{im} Z_{im} \leq CP_{mt} \\ \forall m \in M, \forall t \in [1, T] \quad (3)$$

$$\sum_{m \in M} Z_{im} = 1 \\ \forall n \in N, \forall i \in J_n \quad (4)$$

$$X_i \in \left[\max \left(rp_i, \sum_{m \in AC_i} Z_{im} rc_{im} \right), T \right] \\ \forall n \in N, \forall i \in J_n \quad (5)$$

$$X_i + \sum_{m \in AC_i} Z_{im} l_{im} \leq D_n \\ \forall n \in N \quad (6)$$

$$Z_{im} \in \{0, 1\} \\ \forall n \in N, \forall i \in J_n, \forall m \in M \quad (7)$$

$$CJS\mathcal{A} := \sum_{(i,j) \in E_n} \sum_{h \in AC_i, k \in AC_j} Z_{ih} Z_{jk} lc_{ihk} \\ \forall (h, k) \in E_n, C_h = C_k \quad (8)$$

$$CES\mathcal{A} := \sum_{(i,j) \in E_n} \sum_{h \in AC_i, k \in AC_j} Z_{ih} Z_{jk} l c_{ihk} \quad (9)$$

$$\forall (h,k) \in E_n, C_h \neq C_k$$

$$CECA := \mathcal{DF}_a + \sum_{(i,j) \in E_n} \sum_{h \in AC_i, k \in AC_j} Z_{ih} Z_{jk} l c_{ihA_a} + Z_{ih} Z_{jk} l c'_{ihk} \quad (10)$$

$$\forall a \in C, \forall (h,k) \in E_n, C_h \neq C_k$$

A função objetivo (1), é formada de três componentes principais, a primeira que leva em consideração os custos produtivos dentro da cadeia, sendo importante para a definição da configuração da rede de suprimento da cadeia. A segunda componente ($CIS\mathcal{A}$ (8)) são os custos internos de transporte dentro de cada país. A terceira componente é a de custos externos de transporte, isto é, aqueles fluxos que se iniciam em um país e alcançam a outro, estes custos podem ser sem armazém intermediário ($CES\mathcal{A}$ (9)) ou com armazém intermediário ($CECA$ (10)), sendo escolhido o menor dentre eles, ressaltando que \mathcal{DF}_a armazéns intermediários tem um custo fixo. A utilização de armazéns intermediários alugados em diferentes países podem permitir ganhos de escala na realização do transporte em grandes distâncias.

A restrição (2) garante que a ordem de precedência entre as operações seja obedecida, isto é, que o tempo de início de uma operação deva ser maior que os tempos de finalização das operações precedentes. Também uma empresa jamais deve extrapolar sua capacidade produtiva num intervalo de tempo (3). Já a restrição (4) garante que apenas uma empresa receberá a delegação para executar uma operação. Outra restrição importante é a de uma operação só pode iniciar quando a empresa estiver devidamente preparada para isso (5). Por último, Cada empresa tem um limite de produção D_n (6), e a definição da variável Z_{im} como uma variável binária (7).

A implementação da comunicação entre esses agentes é ilustrada na Figura 6, onde os agentes das empresas de planejamento são responsáveis pelo agendamento das operações de seus interesses e o agente das empresas produtivas elaboram propostas e definem a alocação dos recursos às operações planejadas. Ao realizar um planejamento, deve-se determinar também os recursos de transporte e armazenagem necessários à realização das operações. A contratação de uma operação segue assim quatro fases:

- Solicitação de proposta: para cada operação, os agentes de planejamento devem solicitar propostas para todas as entidades;
- Elaboração da proposta: as entidades que são capazes de realizar a operação enviam suas propostas informando dentre outras coisas o tempo e o custo necessários;
- Avaliação da proposta: todas as propostas recebidas pelo agente de planejamento são recebidas e avaliadas, podendo assim, informar aos agentes produtivos se devem reservar seus recursos ou não;
- Finalização do agendamento: quando todas as operações produtivas tiverem sido atribuídas, então o planejamento deve ser finalizado.

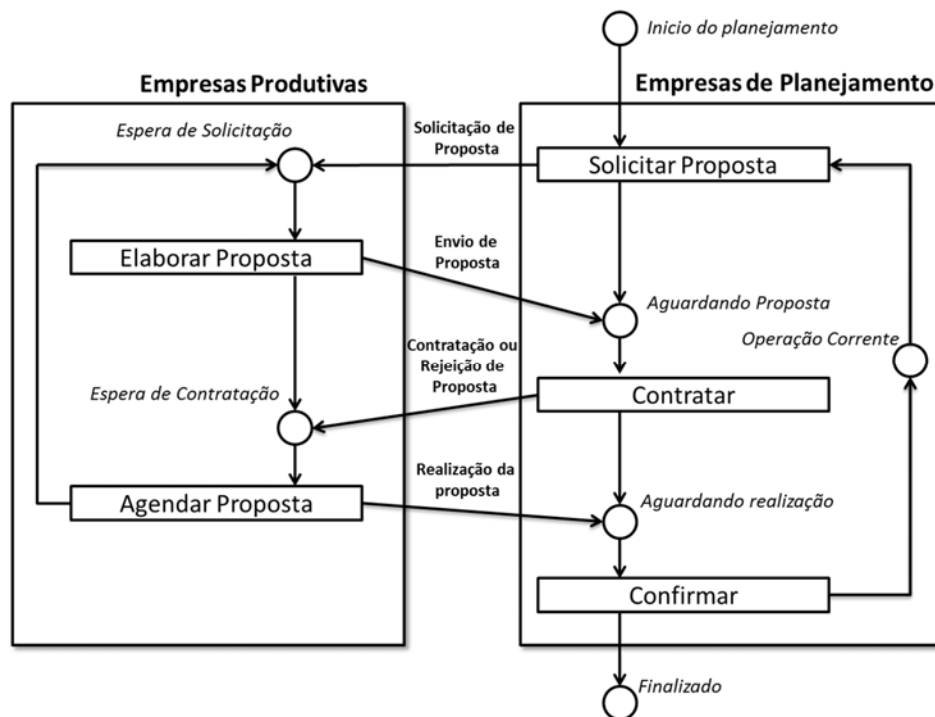


Figura 6: Comunicação entre empresas transportadoras e produtivas

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de agentes na logística já não é mais algo inovador, pois muito já se tem estudado e desenvolvido sobre o tema, porém ainda é desafiador criar modelos mais próximos da realidade dinâmica e caótica em que as empresas estão inseridas. O modelo proposto focou no problema de cadeias de suprimento globais, isto porque a grande parte dos modelos consideram cenários geograficamente mais limitados, ou desprezam a necessidade de realizar ganhos em escala no transporte de longa distância. O modelo também permite a generalização para casos semelhantes.

O modelo teórico proposto não leva em consideração as restrições dos veículos que podem ser utilizados, uma próxima revisão do modelo deve retornar a esta questão a fim de torná-lo mais próximo ainda da realidade. Porém, mesmo com esta limitação o modelo não se limita a observar o horizonte de tempo imediato, os agentes autônomos auxiliam inclusive em decisões estratégicas como a contratação ou não de serviços de armazenagem para consolidação de cargas em países com maior volume de operações.

Considerando que tais sistemas distribuídos necessitam de um elevado grau de modernização e controle para que se possa alcançar a automação, percebe-se que a utilização destes sistemas no Brasil e no mundo ainda é um desafio. É preciso que toda a cadeia de suprimentos esteja estruturada e que os sistemas de informação estejam prontos para realizar diferentes trocas de dados. A partir disso será possível concretizar a almejada automação do controle de processos logísticos baseado em agentes inteligentes.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pela CAPES, CNPq, FINEP e DFG como parte de Iniciativa de Pesquisa Colaborativa em Tecnologia para a Manufatura entre Brasil e Alemanha (BRAGECRIM).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berto, R. M. V. S. e Nakano, D. N. A. (2000) A produção científica nos anais do encontro nacional de engenharia de produção: um levantamento de métodos e tipos de pesquisa. *Produção*, 9, 65-75.
- Bullinger, H. J., Lentes, H. P. e Scholtz, O. (2000) Challenges and chances for innovative companies in a global information society. *International Journal of Production Research*, 38, 1469-1500.
- Chai, J. Y., Sakaguchi, T. e Shirase, K. (2010) A Framework of Multi Objectives Negotiation for Dynamic Supply Chain Model. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 4, 457-468.
- Davidsson, P., Henesey, L., Ramstedt, L., Törnquist, J. e Wernstedt, F. (2005) An analysis of agent-based approaches to transport logistics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13, 255-271.
- Fipa, F. F. I. P. A. (2011) *FIPA* [Online]. IEEE Computer Society. Disponível em: <http://www.fipa.org/> [Acessado em 2011].
- Forget, P., D'amours, S. e Frayret, J. M. (2008) Multi-behavior agent model for planning in supply chains: An application to the lumber industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 664-679.
- Fox, M. S., Barbuceanu, M. e Teigen, R. (2000) Agent-oriented supply-chain management. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 12, 165-188.
- Henoch, J. e Ulrich, H. (Year) Agent-Based Management Systems in Logistics. In: ECAI Workshop, 2000. Citeseer.
- Huhns, M. N. e Stephens, L. M. (1999) *Multiagent Systems and Societies of Agents*. Cambridge (Massachusetts, USA): MIT Press.
- Jiao, J. X., You, X. e Kumar, A. (2006) An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22, 239-255.
- Julka, N., Srinivasan, R. e Karimi, I. (2002) Agent-based supply chain management--I: framework. *Computers & Chemical Engineering*, 26, 1755-1769.
- Lang, N., Moonen, H., Srour, F. J. e Zuidwijk, R. A. (2008) *Multi Agent Systems in Logistics: A Literature and State-of-the-art Review*, Erasmus Research Institute of Management, Erasmus University.
- Lau, J. S. K., Huang, G. Q., Mak, H. K. L. e Liang, L. (2006) Agent-based modeling of supply chains for distributed scheduling. *Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics Part a-Systems and Humans*, 36, 847-861.
- Moyaux, T., Chaib-Draa, B. e D'amours, S. (2006) Supply chain management and multiagent systems: An overview. *Multiagent based Supply Chain Management*. Springer.
- Nilsson, F. e Darley, V. (2006) On complex adaptive systems and agent-based modelling for improving decision-making in manufacturing and logistics settings: Experiences from a packaging company. *International Journal of Operations & Production Management*, 26, 1351-1373.
- Novaes, A. G. (2007) *Logística e Gerenciamento da Cadeia de-Suprimentos*, Rio de Janeiro, Elsevier.
- Nwana, H. S. (1996) Software agents: An overview. *The Knowledge Engineering Review*, 11, 205-244.
- Parunak, H. V. D. (1998) Practical and industrial applications of agent-based systems. *Environmental Research Institute of Michigan (ERIM)*.
- Parunak, H. V. D. (2000) Agents in overalls: Experiences and issues in the development and deployment of industrial agent-based systems. *International Journal of Cooperative Information Systems*, 9, 209-228.
- Schuldt, A. (2010) *Multiagent Coordination Enabling Autonomous Logistics*. University of Bremen.
- Sodhi, M. S. (2001) Applications and opportunities for operations research in internet-enabled supply chains and electronic marketplaces. *Interfaces*, 31, 56-69.
- Wooldridge, M. J. (2002) *An introduction to multiagent systems*, Wiley.