

Um Sistema Multiagente Auto-Interessado para Auxiliar nas Decisões Logísticas de Alocação de Petróleo em Portos

Robison Cris Brito¹, Cesar Augusto Tacla¹

¹Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial –
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Av. 7 de Setembro, 3165 – 80230-901 – Curitiba – PR – Brasil

robison@utfpr.edu.br, tacla@cpgei.cefetpr.br

Abstract. *This paper proposes and evaluates the performance of a multi-agent system for simulating the oil allocation in ports. In this supply chain, ships, piers, tanks, pipelines and refineries are modeled as agents, and they negotiate by auctions to allocate oil cargo. The simulation results are compared with results generated by optimization mathematical models, which are able to find solutions close to the optimal solution for a given scenario, and also compared with the optimal solution of the scenario. Such solution is by means of an exhaustive execution of mathematical models. In the comparisons, the proposed multi-agent system found similar results (less than 2% of difference) to the best solution in a shorter processing time.*

Resumo. *Este trabalho propõe e avalia o desempenho de um sistema multiagente de simulação para ser utilizada na alocação de petróleo em complexos portuários. Nessa cadeia, navios, píeres, tanques, oleodutos e refinarias são modelados como agentes, e através de leilões negociam a melhor maneira de alocar os óleos crus existentes nos navios. Os resultados obtidos são comparados com um modelo de otimização matemático, capaz de encontrar a melhor solução para um dado cenário. Nas comparações, o sistema multiagente proposto encontrou resultados próximos da melhor solução para os cenários (diferença menor que 2%), com um tempo de processamento de alguns segundos.*

1. Introdução

De acordo com Global Supply Chain Forum (2008), o termo *Supply Chain Management* (Gerenciamento de Cadeia de Suprimentos) é definido como um processo que integra informações chave dos fornecedores de produtos, de serviços e informações do usuário final, agregando valor aos consumidores e parceiros. Já Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi (2000) definem Gerenciamento de Cadeia de Suprimentos como um conjunto de abordagens para integrar eficientemente fornecedores, fábricas, depósitos e armazéns, sendo que as mercadorias são distribuídas na quantidade certa, no local certo e na hora certa, minimizando os custos globais do sistema e satisfazendo os requisitos impostos.

Pesquisas recentes (Wang, Liu, Wang *et al.* 2008; Zarandi, Pourakbar e Turksen, 2008) têm utilizado o paradigma de sistema multiagente (SMA) para desenvolver modelos computacionais de gerenciamento de cadeias de suprimentos, baseado na existência de uma correspondência natural entre os participantes de uma cadeia de suprimentos (fábricas, consumidores, fornecedores) e agentes, facilitando a construção do modelo

conceitual do sistema. Além disso, cadeias de suprimentos tendem a ser descentralizadas, com seus participantes atuando de maneira independente, agindo de acordo com seus próprios interesses e políticas, mas compartilhando informações e recursos para alcançar os interesses globais do grupo onde estão inseridos.

Em outras abordagens, como as baseadas unicamente em simulação ou otimização, a tendência é a centralização das informações e do processamento da cadeia de suprimentos. O mundo real é representado através de um modelo composto por um elemento central responsável por todas as decisões tomadas, e que necessita possuir informações específicas de todas as áreas (ex. venda, compra e estoque) envolvidas. Em contrapartida, nas cadeias de suprimentos reais, as informações são descentralizadas e cada elemento possui o conhecimento específico que lhe interessa e, por consequência, tem apenas uma visão parcial e conhecimento incompleto da cadeia como um todo.

No caso específico da indústria do petróleo, existem na literatura diferentes modelos de otimização que tratam da cadeia de suprimentos completa ou apenas de subsistemas desta (Neiro e Pinto, 2004). A maior parte desses modelos é baseada em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e apesar de apresentarem soluções ótimas para o problema, falham em resolver cenários de tamanho real da indústria (cenários complexos).

Neste contexto, o presente trabalho propõe um sistema de simulação multiagente, desenvolvido a partir de modelos PLIM propostos na literatura para a otimização das atividades de um porto, parte da cadeia de suprimento do petróleo. O principal objetivo desse sistema é encontrar soluções para problemas de tamanho real deste sub-sistema da cadeia de suprimentos do petróleo. No sistema proposto, os agentes são autônomos e trabalham de forma coordenada para atingirem o objetivo global – alocar os inventários dos navios da melhor maneira levando em consideração a política adotada (maximizar o lucro ou minimizar o tempo de envio do óleo cru). Os resultados produzidos pelo SMA são comparados com o modelo de otimização baseados em PLIM propostos por Más (2001). Esse modelo foi utilizado também para as comparações de Veiga (2006) e Boscheto *et al.* (2009).

2. Problema do Porto

O problema do porto é apresentado inicialmente em Más (2001), e posteriormente utilizado na validação dos modelos propostos por Veiga (2006) e Boschetto *et al.* (2009). Más (2001) propõe uma solução para otimizar a alocação de recursos em portos de petróleo. O subsistema da cadeia de suprimento de petróleo relativo aos complexos portuários possui uma estrutura complexa, formada por píeres, tanques de armazenamento e redes de tubulações que, por sua vez, são interligados às refinarias. As refinarias possuem uma infra-estrutura própria de armazenamento, com unidades de destilação de petróleo que consomem óleo cru a uma vazão conhecida a partir de uma rede de oleoduto.

A principal restrição física existente no modelo do porto está ligada ao armazenamento de petróleo, já que não existem tanques dedicados para armazenar cada um dos diferentes tipos de óleo transportados pelos navios. Por isso, os tipos de óleo são divididos em classes, sendo que cada tanque ou conjunto de tanques dedicados armazena uma classe de óleo específica. Diferentes tipos de óleo de uma mesma classe podem ser armazenados em um mesmo tanque, não prejudicando as características qualitativas do óleo.

Os diferentes tipos de óleo chegam ao porto unicamente por meio de navios, os quais devem descarregar por completo seus inventários em um dos píeres. É estipulado ao navio uma hora de entrada e de saída do porto, que deve ser respeitada. Ao ultrapassar a hora de saída determinada para o navio, é cobrada uma taxa de sobrestadia. O navio pode descarregar o tipo de óleo que carrega em diferentes tanques no porto, desde que a classe do tanque seja compatível com o tipo de óleo descarregado. Cada classe de óleo possui um valor monetário associado ao volume de óleo, existindo classes mais nobres e menos nobres. A quantidade de óleo em um tanque deve respeitar o volume mínimo e máximo associado ao tanque, e o mesmo só pode descarregar pelo oleoduto após um período de decantação superior a 24 horas.

O oleoduto envia o óleo cru dos tanques para a refinaria, que por sua vez, possui um limite mínimo e máximo de estoque que devem ser respeitados, e também um consumo horário de óleo cru em suas unidades de destilação a uma vazão conhecida.

De acordo com Veiga (2006) e Boschetto *et al.* (2009), apesar da solução obtida por Más (2001) melhorar a transferência de óleo dos navios para as refinarias, sob o aspecto dos custos envolvidos nesta operação, o tempo computacional para a obtenção da solução é elevado (da ordem de horas) comparado às rápidas decisões que precisam ser tomadas diariamente no terminal portuário num período de poucas horas ou mesmo minutos. A isto se soma o fato de que para problemas com um maior número de navios e classes de óleos e com tancagem limitada, característica comum dos cenários reais, o modelo proposto por Más (2001) esbarra na limitação de recursos computacionais existentes para a solução do problema.

3. Trabalhos Relacionados

Na pesquisa bibliográfica realizada, foi encontrada algumas abordagens referentes ao gerenciamento da cadeia de suprimento de portos petrolíferos. Na sua totalidade, o problema foi abordado utilizando programação linear.

O trabalho mais relevante foi desenvolvido por Más (2001), e sua metodologia será comparada com o sistema multiagente proposto. O trabalho aborda problemas de programação de suprimentos de petróleo. As soluções apresentadas são factíveis, já que consideram uma margem de otimalidade a ser respeitada, entretanto, executando o modelo exaustivamente e sem a margem de otimalidade, é possível encontrar o melhor resultado para um dado cenário (ótimo global).

Boschetto *et al.* (2009) compara sua metodologia com a metodologia de Más (2001). No trabalho, a autora desenvolve um modelo que faz uso de pré-processamento, a qual identifica a restrição mais complexa (na situação foi identificada como restrição mais complexa a decantação de 24 horas dos tanques no porto), e após, realiza um pré-processamento sem essa restrição, sendo os resultados desse pré-processamento aplicados novamente ao modelo completo, o que resultou em um aumento significativo na velocidade de processamento, perdendo pouco na qualidade dos resultados finais.

Veiga (2006) também compara sua metodologia com o modelo de Más (2001), propondo uma hierarquização do modelo de otimização. Seu trabalho divide o modelo com base nos três elementos básicos de *scheduling*. Dessa maneira, o Modelo do Porto proposto por Más (2001) é dividido nos modelos que envolvem *assignment* (determinação dos recursos), *sequencing* (seqüenciamento das atividades) e *timing* (temporização do uso dos recursos). A abordagem feita por Veiga (2006) obtém

resultados em tempos computacionais melhores que os resultados da abordagem feita por Más (2001), levando em consideração as mesmas margens de otimalidade.

Magatão *et al.* (2004) também abordam o problema de transferência entre o porto e a refinaria. Contudo, no modelo apresentado, o oleoduto que transporta diferentes tipos de óleos crus pode operar em reversão, ou seja, um mesmo duto pode transportar óleo da refinaria para o porto ou do porto para a refinaria. O modelo aborda o *scheduling* do oleoduto em um horizonte de tempo pré-fixado objetivando minimizar os custos operacionais. A formulação utiliza PLIM com discretização uniforme do tempo.

Em todos os modelos apresentados para a transferência e estocagem, a solução obtida é apenas factível. Os autores não apresentam a solução ótima devido ao elevado tempo computacional necessário para a sua obtenção.

Uma alternativa para diminuir o tempo computacional necessário é dividir o problema em sub-problemas, assim o sistema se aproxima de um modelo real, onde não existe um elemento central que processe e armazene todas as informações. Na prática, os elementos de um sistema possuem uma visão parcial do todo e são especialistas em atividades específicas, com isso torna-se possível encontrar soluções factíveis para problemas complexos como o gerenciamento de cadeias de suprimento de petróleo com um tempo de processamento reduzido.

Dividir problemas complexos em sub-problemas é um dos conceitos fundamentais da programação baseada em agentes, que visa distribuir o conhecimento em entidades de software que possuem uma visão local e informações incompletas do sistema como um todo, comunicando-se para trocar informações e atingirem os objetivos globais do sistema.

4. Arquitetura proposta

Para o sistema multiagente proposto, levou-se em consideração as informações sobre o Modelo do Porto – Capítulo 2, modelando-o como um sistema multiagente.

4.1. FIPA Contract-Net Aplicado ao Modelo do Porto

Para que os agentes trabalhem em conjunto, é necessário que negociem em vários momentos. No SMA proposto, os agentes são auto-interessados, procurando absorver o máximo de recursos possíveis, entretanto quando um agente descobre que o recurso será melhor alocado em outro agente, esse permite a alocação mais lucrativa.

O SMA auto-interessado trabalha com duas políticas de alocação: maximização do lucro do sistema ou envio rápido do óleo-cru do navio para a refinaria. Em algumas situações, a refinaria está com o estoque próximo do mínimo, sendo assim o tempo de envio tem prioridade sobre o lucro do sistema.

Para a estratégia de negociação, não foram desenvolvidas heurísticas complexas de troca de dados e tomada de decisão específica para o problema, optando-se pela implementação FIPA (FIPA, 2008) do protocolo de leilão Contract-Net (Smith, 1980). A utilização de um protocolo padrão permite que o simulador do porto seja facilmente adaptado a outros casos, como por exemplo o Modelo da Subestação.

O protocolo de leilão se adapta bem ao modelo do porto por que há disputa por recursos (píeres disputam navios e tanques disputam os vários tipos de óleo cru). Outro motivo que levou a escolha do leilão é que o mesmo satisfaz os quatro requisitos mínimos de

uma boa metodologia de negociação definidos por Wang, Liu, Wang *et al.* (2008): simplicidade, eficiência, pouco tempo de negociação e estabilidade.

Dentre os diversos modelos de leilão (Smith, 1980), foi utilizado o Leilão de Lance Fechado de Primeiro Preço, que é uma variação do Leilão Inglês. No leilão inglês original, os participantes podem enviar vários lances, e ao final, quem enviar o lance com maior valor ganha o leilão. A diferença no Leilão de Lance Fechado de Primeiro Preço é que todos os participantes têm o direito de enviar um único lance. Após a chegada de todos os lances ou após um tempo limite (deadline), o agente que iniciou o leilão irá selecionar a melhor proposta para atender sua solicitação.

Para o SMA foi utilizado leilão em três momentos, como apresentada na Figura 1.

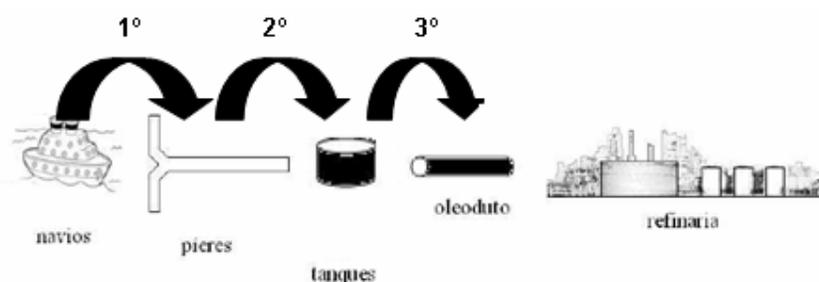


Figura 1: Leilões utilizados pelo SMA auto-interessado para alocação de óleo cru de navios.

Ao chegar no porto o navio inicia o primeiro leilão, solicitando propostas de atracagem aos píeres compatíveis. Os píeres, por sua vez, ao receber o pedido de proposta do navio inicia um segundo leilão, solicitando propostas dos tanques para saber em qual o inventário será melhor alocado. Ao receber as respostas dos tanques, o píer seleciona a mais lucrativa ou a que possui menor tempo para descarregamento, dependendo da política de alocação adotada, formatando uma nova proposta que será enviada ao navio, essa contém o tempo para o descarregamento e os custos de atracagem e sobrestadia. Por fim, ao receber a proposta do píer, o navio seleciona a melhor, confirmando a atracagem e o descarregamento nos tanques selecionados no segundo leilão.

O tanque, por sua vez, ao atingir sua capacidade máxima inicia o terceiro leilão solicitando propostas de descarregamento aos oleodutos. O oleoduto que tiver um menor custo de interface¹ ou estiver ligado à refinaria com menor estoque ganha o terceiro leilão.

Todos os agentes do sistema possuem tabelas individuais com as agenda de utilização, sendo que estas permanecem atualizadas com o objetivo de evitar a alocação de dois recursos no agente em um mesmo intervalo de tempo.

4.2. Agentes do Sistema

Para o sistema proposto, foram identificados cinco tipos de agentes, sendo eles:

- Agente Navio: Agente responsável por fornecer recursos ao sistema multiagente. O agente navio é um elemento dinâmico do sistema podendo ser incluído ou

¹ Interface é um tipo de óleo com menor valor agregado utilizado entre o envio de duas classes de óleo diferentes, quanto mais diferente as classes de óleo, maior o custo da interface.

retirado a qualquer momento. Ao ser inserido, o agente navio tem por objetivo descarregar seu inventário de óleo cru nos píeres de maneira otimizada.

- **Agente Píer:** O objetivo desse agente é a atracagem do maior número de navios. Ao receber a informação da chegada de um novo navio, o agente píer tenta recebê-lo procurando maneiras de minimizar os custos da atracagem e de maximizar os lucros do óleo recebido. O píer só envia proposta para os navios de tamanhos por ele suportados.
- **Agente Tanque:** Agente responsável por armazenar os carregamentos de óleos crus provenientes dos navios. Seu objetivo é receber a maior quantidade possível de óleo cru. Ao receber a informação da chegada de um navio, envia aos píeres sua proposta para receber o carregamento de óleo. Sua proposta pode ser total ou parcial. Também é tarefa do agente tanque agendar a decantação, bem como negociar com o agente oleoduto o envio de seu inventário para a refinaria.
- **Agente Oleoduto:** Possui a função de enviar os óleos crus dos tanques para a refinaria. Ao receber uma requisição de envio, o agente oleoduto verifica se a refinaria suporta o novo inventário, se positivo o descarregamento é agendado.
- **Refinaria:** Agente que consome óleo cru a uma vazão conhecida, envia constantemente informações aos oleodutos que alimentam a refinaria sobre sua situação e sua agenda de recebimento de novas quantidades de óleos crus, garantindo que seu estoque fique sempre entre o mínimo e o máximo estabelecido.

4.3. Definição das Políticas de Alocação de Recursos

Para a modelagem do SMA proposto, foi analisado o processo de desenvolvimento de um modelo utilizando PLIM, com o objetivo de unir as vantagens de um SMA (descentralização) com as vantagens presentes na PLIM (garantia que as restrições serão respeitadas e a que o ótimo da função objetivo será atingido).

4.3.1. Função Objetivo do Sistema

A função objetivo utilizada pelo SMA para o problema do porto possui como critério a maximização do lucro, ou seja, a diferença entre receitas e despesas (custos) no porto. Para o presente trabalho, foi utilizada a mesma função objetivo de Más (2001), Veiga (2006) e Boschetto et al. (2009), a qual visa maximizar o valor agregado nos óleos enviados aos tanques do porto e a refinaria, minimizando os custos de utilização dos píeres, os custos de sobrestadia dos navios no porto e o custo da interface entre diferentes tipos de óleos no oleoduto.

Como o sistema proposto é multiagente, a implementação da função objetivo é distribuída na lógica dos vários agentes inseridos no sistema, sendo que cada agente realiza apenas as funções específicas referentes à suas atividades na cadeia de suprimento. Desta forma os itens da função objetivo foram distribuídos entre os vários agentes envolvidos. Por exemplo, o agente responsável por minimizar os custos de sobrestadia do navio no porto é o agente píer, uma vez que a agenda que ela prepara para o navio deve respeitar o período de entrada do navio no porto e não deve ultrapassar o tempo limite de saída do navio. Caso seja necessário utilizar sobrestadia, procura-se minimizar esse tempo.

4.3.2. Restrições do Sistema

As restrições são regras que devem ser respeitadas ao se gerar uma solução. Na programação linear inteira mista elas são representadas por um conjunto de equações/inequações.

Assim como a função objetivo, as restrições também são tratadas individualmente pelos agentes do sistema, por exemplo, a restrição de um tanque só pode enviar óleo pelo oleoduto após um período de decantação de no mínimo 24 horas é tratada pelo agente tanque, que ao aferir que sua capacidade está próxima do máximo, agenda o período de decantação de 24 horas, e envia um pedido de cotação aos oleodutos para o descarregamento na seqüência.

5. Resultados e Análise

Para comparar de maneira justa os resultados gerados pelo SMA auto-interessado com os resultados obtidos por sistemas que fazem uso da PLIM (Más, 2001), foram utilizadas no desenvolvimento do simulador as mesmas restrições e as mesmas funções objetivo utilizadas por esse autor.

Para testar os resultados produzidos pelo simulador multiagente, foram utilizados cinco cenários, sendo estes também utilizados por Más (2001), Boschetto *et al.* (2009) e Veiga (2006). Os cenários são simplificações do cenário real referente ao porto de São Sebastião-SP e foram extraídos de Más (2001). Em todos os cenários foram utilizados um oleoduto e uma refinaria (oleoduto OSVAT que liga o porto de São Sebastião-SP à refinaria em REVAP em São José dos Campos-SP).

Para os cenários com a agenda conhecida de 3 e 4 navios, foram utilizados 2 píeres e 5 tanques. Para os cenários com 5, 6 e 7 navios foram utilizados 4 píeres e 10 tanques. Detalhes dos cenários em Más (2001).

O SMA auto-interessado pode funcionar em dois modos distintos, no primeiro procura-se a maximização da função objetivo (lucro) do sistema e no segundo, a minimização do horizonte de planejamento. Ambos são utilizados nas comparações.

Esses resultados são comparados com o resultado obtido pelo modelo proposto por Más (2001), de agora em diante referenciado como modelo original, utilizando o mesmo tempo de processamento que o SMA levou para encontrar um resultado factível e com o resultado ótimo global do cenário. Para a obtenção do Ótimo Global, que é o melhor resultado para um cenário, foi utilizado o modelo original sendo este executado exaustivamente até encontrar o resultado ótimo, por esse motivo Boschetto *et al.* (2009) e Veiga (2006) também o utilizou para suas comparações.

A Tabela 1 apresenta os resultados das execuções realizadas em 5 cenários distintos. Em algumas situações (nos cenários mais complexos), o solver do PLIM apresentou erro de falta de memória, o que evidencia a dificuldade do PLIM em trabalhar com sistemas complexos, por esse motivo os resultados apresentados em itálico na tabela são as melhores soluções factíveis encontradas até o momento em que ocorreu a falta de memória.

Tabela 1: Soluções para os cenários com SMA auto-interessados

	Cenário	SMA auto-interessado Otimização do Lucro	SMA auto-interessado Otimização do Horizonte	Modelo Original com limitação de tempo	Modelo Original sem limitação de tempo (Ótimo Global)
Tempo Execução	3 navios	9s	9s	9s	3h47m8s
	4 navios	10s	10s	10s	6h11m54s
	5 navios	16s	16s	16s	2h32m10s *
	6 navios	19s	19s	19s	2h16m55s *
	7 navios	23s	23s	23s	2h2m20s *
Função Objetivo	3 navios	5.217,25	4.828,51	5.005,71	5.288,85
	4 navios	5.817,71	5.404,02	5.469,03	5.924,51
	5 navios	10.344,27	9.218,45	9.520,23	9.910,88 *
	6 navios	13.083,18	11.808,76	11.398,60	12.144,11 *
	7 navios	16.151,39	11.171,84	10.016,87	12.146,86 *
Horizonte de descarregamento total	3 navios	106 horas	94 horas	106 horas	106 horas
	4 navios	111 horas	107 horas	111 horas	111 horas
	5 navios	154 horas	149 horas	154 horas	154 horas
	6 navios	185 horas	179 horas	185 horas	185 horas
	7 navios	212 horas	197 horas	212 horas	212 horas

A comparação gráfica entre os valores da função objetivo são apresentados na Figura 2.

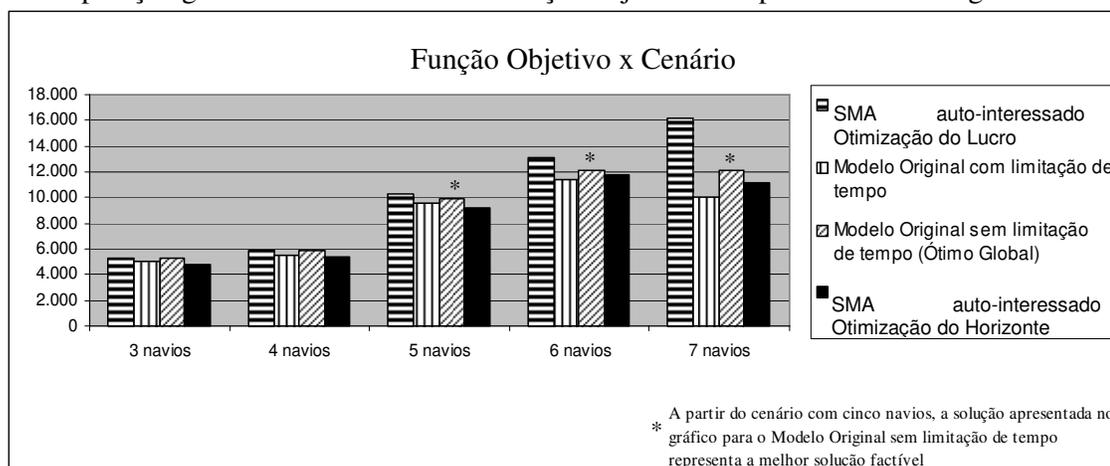


Figura 2: Comparação das funções objetivo com SMA auto-interessado

A comparação dos resultados acontecem em três momentos: é comparado o tempo do sistema para encontrar as soluções; comparado o valor da função objetivo das soluções encontradas nas diferentes abordagens e; o horizonte de descarregamento total, sendo este o tempo necessário para todos os navios enviarem seus inventários para a refinaria.

Como pode ser observado, em todos os cenários apresentados o SMA obteve resultados factíveis em segundos, enquanto que para a obtenção do resultado ótimo o modelo original levou algumas horas (para os cenários com 5, 6 e 7 navios, o PLIM não encontrou resultados ótimos, devido à erro de falta de memória, nessa situação foi apresentado o tempo de processamento até o momento do erro).

Levando-se em consideração da função objetivo, o SMA auto-interessado com Otimização do Lucro encontrou resultados próximos do ótimo global para os cenários

* Melhores resultados factíveis obtidos antes do erro de falta de memória na PLIM.

com três (1,35% menor) e quatro navios (1,8% menor), mesmo levando um tempo de processamento bastante inferior. Para os cenários com 5, 6 e 7 navios a função objetivo encontrada pelo SMA é superior ao Ótimo Global, uma vez q nessas situações o solver PLIM apresentou erros de falta de memória.

Ao comparar o valor da função objetivo obtido pelo SMA auto-interessado com Otimização de Lucro com o valor obtido pelo Modelo Original com limitação de tempo, o SMA apresentou valores superiores em todos os cenários, sendo que a medida que se aumenta a complexidade do cenário, é evidenciada a superioridade do SMA.

Por fim, ao comparar os resultados obtidos pelo SMA auto-interessado com Otimização do Horizonte com as outras abordagens, a mesma gerou horizontes de planejamento inferiores em todas as situações, entretanto o valor da função objetivo dessa abordagem ficou comprometido.

Chega-se a conclusão que só é interessante utilizar a otimização do horizonte de planejamento quando se necessita enviar uma grande quantidade de óleo cru para a refinaria em um curto espaço de tempo, pois o lucro do sistema (o valor da função objetivo) é comprometido consideravelmente, uma vez que ao escolher os tanques, o píer passa a utilizar aqueles com lucratividades menores, já que esses são pouco utilizados e comumente possuem sua agenda livre. Pode-se citar como exemplo de utilização de SMA auto-interessado com Otimização do Horizonte uma situação onde a refinaria está com seu inventário próximo do mínimo, dessa forma, ao chegar um novo navio no porto, a antecipação do envio do inventário para refinaria é mais importante do que o lucro que esse navio pode gerar no sistema, já que uma refinaria parada por falta de óleo gera prejuízos consideráveis.

6. Conclusões

O trabalho apresentou um SMA para o gerenciamento de cadeia de suprimento para portos de petróleo. Para o desenvolvimento, foi utilizado o leilão como técnica de negociação, bem como constantes trocas de mensagens entre os agentes para o compartilhamento das informações.

Para o desenvolvimento do simulador multiagente, foram analisados modelos de PLIM, estes organizados em restrições e funções objetivo, bem como seus resultados otimizados, o que possibilitou uma política eficiente para alocação de recursos. Devido à implementação das restrições e da função objetivo na lógica dos agentes, encontrou-se resultados que não violaram as restrições do sistema e otimizaram ao mesmo tempo o lucro e o horizonte de planejamento, maximizando a função objetivo.

Com isso, os resultados apresentados foram satisfatórios, uma vez que o SMA conseguiu encontrar melhores resultados comparado ao modelo de PLIM, quando este possui limitação de tempo.

Ressalta-se que o SMA encontra resultados bons com pouco tempo de processamento, pois o mesmo não otimiza o sistema como um todo (não existe a garantia de encontrar o ótimo global), e sim otimiza a alocação de um navio de cada vez. Após a alocação de cada navio, a mesma não pode mais ser modificada, se transformando em restrição pesada.

Quanto à escalabilidade, o sistema apresentou um bom desempenho, mesmo com um grande número de agentes (5, 6 e 7 navios), superando o valor da função objetivo do

modelo original que faz uso da PLIM em até 34,21% nos testes realizados para o cenário com sete navios, lembrando que nesses cenários (5 à 7 navios) o PLIM encontrou resultados factíveis.

Referente à adaptabilidade do SMA proposto, como o mesmo não utiliza heurísticas complexas e específicas de negociação para o problema do porto, utilizando apenas o protocolo de leilão FIPA Contract-Net, o sistema pode ser adaptado sem muito esforço para outros problemas de agendamentos (*scheduling*).

Referências

- Boschetto, S. Luders, R. Arruda, L. V. R. Neves Júnior, F. (2007). “Otimização da Programação de Operações em Terminais Petrolíferos”. Quarto Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.
- FIPA - Foundation For Intelligent Physical Agents. (2009). “FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification”. Disponível em: www.fipa.org/specs/fipa00029/SC00029H.pdf. Acessado em: 27/04/2009.
- Global Supply Chain Forum. (2009). Disponível em: <http://fisher.osu.edu/centers/scm>. Acessado em: 27/04/2009.
- Magatão, L. Arruda, L. V. R. Neves-Jr, F. (2004). “A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline”. In: Computers and Chemical Engineering, v. 28, p. 171–185.
- Más, R.. (2001). “Otimização da Programação de Suprimento de Petróleo”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Neiro, S. M. S. Pinto, J. M. (2004). “A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chain”. In: Computers and Chemical Engineering, v.28, p. 871-896.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E. (2000). “Designing and Managing the Supply Chain”. In: McGraw-Hill Higher Education.
- Smith, R. G. (1980). “The Contract Net Protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver”. IEEE Transactions on Computers, v.29, n.12, p. 1104-1113.
- Veiga, S. L. (2006). “Modelo Hierarquizado para Scheduling de Suprimento de Petróleo”. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Wang, M. Liu, J. Wang, H. Cheung, W. K. Xie, X. (2008) “On-demand e-supply chain integration: A multi-agent constraint-based approach”. In: Expert Systems with Applications: An International Journal, v. 43.
- Zarandi, M. H. F. Pourakbar, M. Turksen, I. B. (2008). “A Fuzzy agent-based model for reduction of bullwhip effect in supply chain systems”. In: Expert Systems with Applications: An International Journal, v. 34.