

Um ambiente *Multiagent System* (MAS) distribuído aplicado à gestão integrada da operação portuária

Rodrigo de Alvarenga Rosa¹, Rafael Silva Banos², Bruno Mannato Angius³ e Thiara Cezana Gomes⁴

Resumo: Tendo em vista o aumento do transporte marítimo no mundo e a consequente demanda por operações nos portos, os operadores buscam formas de minimizar o tempo de permanência dos navios no porto. Para atracar um navio, os portos necessitam ter disponíveis diversos recursos. Assim, planejar a designação de recursos eficientemente para não atrasar a atracação dos navios é vital para os portos. Esta designação é dinâmica, pois atrasos e antecipações na chegada dos navios ocorrem por diversos fatores demandando assim que ela seja atualizada constantemente. Este artigo propõe um Multiagent System (MAS) para resolução da designação de recursos de forma distribuída e em tempo real, visando reduzir o tempo de espera para atracação dos navios. Testes foram realizados em 27 cenários e os resultados mostraram que o MAS resolveu instâncias de teste de grande porte e nos cenários mais próximos do real, ele resolveu em um tempo pequeno e com soluções estáveis.

Palavras-chave: inteligência artificial distribuída, planejamento de terminal portuário, sistemas multiagentes.

Abstract: Maritime transport is growing in the world and consequently the demand for port operations is also growing. Thus, port operators seek to minimize the time that the ships expend at the port. To berth a ship, ports have to provide several resources. So, plan the resource allocation efficiently to avoid a delay on the ships' berthing time is vital to the ports. This allocation is dynamic because delays and anticipations occur in the ships' arrival time by several factors, leading to a constantly update of the berthing date. This paper proposes a Multiagent System (MAS) to solve the resource allocation in a distributed way and in real time, seeking the reduction of the ships' waiting time for berthing. Tests were done in 27 scenarios and the results showed that the MAS solved big instances in a short time and with stable solutions.

Keywords: distributed artificial intelligence, planning port operation, multiagents systems.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do comércio marítimo internacional tem sido expressivo. No ano de 1970 foram transportadas 2,6 milhões de toneladas, passando a 9,5 milhões de toneladas em 2013, ou seja, um crescimento de 366,5% (UNCTAD, 2014). Com esse aumento expressivo, houve um aumento de navios viajando entre os portos e demandando mais atracções também. Para atracar um navio no porto, faz-se necessário que diversos recursos estejam disponíveis na hora de sua atracção. Dentre esses recursos, citam-se: berços, guindastes, áreas de pátios e equipamentos de pátios. Uma eficiente alocação destes recursos aos navios pode reduzir o tempo de espera dos navios para atracar e, conseqüentemente, reduzir o tempo de permanência do navio no porto também.

Assim, caso exista na data solicitada de atracção a disponibilidade de berço de atracção, áreas de pátio e de equipamentos para operar o berço e o pátio, faz-se a reserva deles de tal maneira que quando o navio chegar para operar, todos os recursos estejam disponíveis para atendê-lo. Caso não haja essa disponibilidade, o porto informa ao navio uma data possível quando terá todos os recursos para atendê-lo.

Estes recursos deverão ficar disponíveis durante toda a operação do navio e só na desatracção serão liberados para outro navio.

Na prática, para a designação dos recursos aos navios, ocorre um longo processo de negociação entre os proprietários de navios que solicitam atracção e o porto, representado por seus diversos departamentos, a gerência de cais, a gerência de pátio e a gerência de equipamentos. Neste processo de negociação, nem todas as informações são conhecidas pelos negociadores, tendo em vista que muitas delas são confidenciais, internas às empresas e/ou departamentos, e assim as decisões são tomadas com as informações disponíveis no momento. Dessa maneira, modelos de otimização baseados em modelagem matemática não se apresentam como uma solução mais adequada para este tipo de problema, pois geralmente pressupõem informações que não estão disponíveis.

O ideal é que a designação destes recursos seja realizada em tempo real, ou seja, quando um navio informa que houve alteração na sua data de chegada, possa haver uma nova designação dos recursos visando reajustar o planejamento da seqüência de atracção de todos os navios e que isto também seja informado em tempo real aos proprietários dos navios que sofrerão alteração na sua previsão de atracção.

Na literatura, três problemas foram propostos para apoiar a gestão da operação portuária: *Berth Allocation Problem* (BAP), *Quay Crane Assignment Problem* (QCAP) e *Yard Management System* (YMS). Atualmente, estes problemas são tratados na grande maioria dos artigos como modelos matemáticos com pouca ou nenhuma integração entre si. Tratar esses problemas de forma ótima ou mesmo por meio de meta-heurísticas com pouca integração pode levar a resultados que não sejam os melhores para operação

¹ Rodrigo de Alvarenga Rosa, Departamento de Engenharia, UFES. (rodrigo.a.rosa@ufes.br)

² Rafael Silva Banos, Departamento de Engenharia, UFES. (rafaelsilvabanos@hotmail.com)

³ Bruno Mannato Angius, Departamento de Engenharia, UFES. (bmannato@gmail.com)

⁴ Thiara Cezana Gomes, Departamento de Engenharia, UFES. (thiaracezana@hotmail.com)

Manuscrito recebido em 13/04/2014 e aprovado para publicação em 09/08/2016.

Este artigo é parte de TRANSPORTES v. 24, n. 2, 2016. ISSN: 2237-1346 (online). DOI:10.4237/transportes.v24i2.777

porto como um todo. Além disso, as abordagens por formulações matemáticas são de difícil implementação em tempo real, pois usualmente demoram muito tempo para chegar a um resultado.

Este artigo propõe um *Multiagent System* (MAS) para resolução totalmente integrada dos três problemas de forma distribuída e em tempo real visando o menor tempo de permanência dos navios no porto. Também propõe uma abordagem inspirada na sociedade humana onde muitos dos problemas são resolvidos por meio da interação/negociação entre diversos indivíduos, os quais sozinhos não poderiam resolver todos os problemas, porém, quando se unem e trabalham em conjunto, cada um com seus recursos e capacidades, eles conseguem resolvê-los. Com base nesta abordagem, foi criado um sistema computacional que cria uma sociedade virtual de agentes que possuem recursos não compartilhados e, por meio de mensagens trocadas entre si, negociam até convergir para designar os recursos necessários para a atracação dos navios visando reduzir o tempo de permanência dos navios no porto.

Visando uma aplicação real do MAS proposto, o mesmo foi testado com base em dados reais fornecidos pelo Terminal de Produtos Diversos (TPD) em Vitória – ES. Para avaliar o sistema, foi elaborado um modelo de simulação de eventos discreto como modelo de referência por seu caráter dinâmico e estocástico, sendo o ambiente que mais se assemelha ao MAS proposto, apesar de não oferecer todas as funcionalidades do MAS proposto. No entanto, vale destacar que o MAS proposto define em tempo real, à medida que as solicitações de atracação chegam, todos os recursos que o navio necessitará, berço, área de pátio, equipamentos de berço e de pátio e qual a data que o navio irá efetivamente atracar. Com isso, o porto pode ter em tempo real a fila de navios a atracar, sendo que cada navio ao estar designado nesta fila já tem todos os recursos agendados. Nada disso ocorre no sistema de simulação, onde se busca analisar a dinâmica da chegada de navios e ver as situações gargalos, sem uma definição de quais equipamentos especificamente serão utilizados por cada navio. Aliado a isso o modelo de simulação gera navios aleatórios o que não permite ao porto ter efetivamente a programação dos navios.

O artigo é organizado como segue: na Seção 2 tem-se uma breve revisão com conceitos teóricos e trabalhos relevantes sobre o MAS, BAP, QCAP e YMS. Na seção 3 é apresentada a descrição da implementação do MAS proposto e o MAS proposto para a operação portuária. Na Seção 4 é apresentada a metodologia de testes e validação. Na Seção 5 têm-se a apresentação e a análise dos resultados encontrados. Finalmente, na Seção 6, têm-se as conclusões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Um MAS é composto por vários agentes que interagem ou trabalham em conjunto de forma a realizar um determinado número de tarefas ou objetivos. Esses objetivos podem ser globais do sistema, comuns a todos os agentes, ou individuais. Os agentes podem também assumir um comportamento colaborativo ou competitivo, dependendo da finalidade da aplicação com que o sistema multiagente foi designado. Isto é, os tipos de agentes são definidos de acordo com o ambiente onde irão atuar. Cada agente deve negociar com os outros agentes a ajuda necessária, recursos

ou serviços, para resolver um problema que ele, individualmente, não consegue resolver. Os agentes possuem seus próprios objetivos e não compartilham informações sobre os objetivos individuais dos outros agentes nem sobre o objetivo global do sistema (O'HARE e JENNINGS, 1996).

Wooldridge (2000) conceitua agente como sendo um programa de computador que está situado em um ambiente e que é capaz de tomar ações autônomas nesse ambiente a fim de realizar seus objetivos. Os agentes podem ser classificados conforme o seu grau de cooperação com os outros agentes. Desta maneira, o agente é cooperativo quando compartilha um objetivo global que é igual para todos os agentes do ambiente e trabalha em prol deste objetivo, e competitivo quando possui objetivos próprios e não compartilha um único objetivo global. Neste último tipo de agente uma solução global é conseguida por meio da negociação, sendo que esta solução pode vir a ser diferente da solução individual desejada (ROSA, 2006). Assim, as principais interações entre agentes são a negociação de um serviço, a comunicação entre si e o planejamento das ações. Essas interações visam a resolução de problemas por meio da coordenação de recursos e conhecimentos específicos.

Os problemas BAP, QCAP e YMS têm recebido uma boa atenção da comunidade acadêmica (VIS e DE KOSTER, 2003), (STEENKEN *et al.*, 2004), (BIERWIRTH e MEISEL, 2010), (STAHLBOCK e VOB, 2008), (RASHIDI e TSANG, 2013). O BAP refere-se ao problema de alocação de berço para o atendimento de navios em um dado horizonte de tempo gerando a sequência de atendimento de navios. Restrições temporais referem-se aos horários de atracação e de desatracação dos navios (BIERWIRTH E MEISEL, 2010). Dentre os diversos artigos sobre o BAP, destacam-se: Imai *et al.* (2001), Theofanis *et al.* (2007a), Umang *et al.* (2011), Monaco e Sammarra (2007), Imai *et al.* (2003), Cordeau *et al.* (2005), Mauri *et al.* (2010), Hansen *et al.* (2008), Zhou *et al.* (2006), Han *et al.* (2006), Golias *et al.* (2007) e Barros *et al.* (2011).

O QCAP se refere ao problema de atribuir guindastes para cada navio de forma que em um dado horizonte de tempo de planejamento todos os carregamentos/transbordos requeridos sejam cumpridos. O objetivo típico do QCAP é minimizar o tempo de permanência dos navios no porto evitando as perdas oriundas dos tempos de movimentação dos guindastes e da falta de guindastes para operar o navio (BIERWIRTH e MEISEL, 2009). Segundo Bierwirth e Meisel (2010), o QCAP e o BAP são inter-relacionados, pois, a resolução do problema de alocação de guindastes tem um forte impacto no tempo de operação dos navios. Dentre os diversos trabalhos sobre o QCAP, destacam-se: Oguz *et al.* (2004), Imai *et al.* (2008), Meisel Bierwirth (2006), Theofanis *et al.* (2007b) e Lokuge e Alahakoon (2007).

O YMS é composto essencialmente por três atividades a fim de otimizar o uso do pátio, são elas: utilização do *layout* do pátio, minimização do transporte horizontal e programação da alocação dos guindastes de pátio. Tais tarefas visam coordenar as operações de carga/descarga do navio com o objetivo de minimizar a distância total guindaste-pátio, minimizar o congestionamento de cargas no pátio e/ou balancear a carga de trabalho dos guindastes. Dentre os diversos trabalhos sobre o YMS, destacam-se: Chen *et al.* (2000), Kim e Bae (1998), Kim *et al.* (2000), Kim e Park (2003), Chen *et al.* (1995), Crainic *et al.* (1993) e Cheung e Chen (1998).

Quanto ao uso de MAS aplicado à área portuária, Yu e Wang (2006) propuseram um MAS com ambiente *blackboard* onde cada agente possui uma base de conhecimento, uma máquina de raciocínio, um gestor de cooperação e um controlador de tarefas e comunicador. Yan *et al.* (2008) apresentaram um MAS para alocação de recursos e solução de problemas de agendamento nas operações em terminais de contêiner a fim de otimizar sua produtividade. São parcialmente apresentadas estratégias de cooperação entre agentes, mecanismos de comunicação e implementação. Sun *et al.* (2009) propuseram um MAS com arquitetura híbrida usando o *Contract Net Protocol* como estratégia de negociação para realizar a interação e colaboração entre os agentes. Li e Yan (2010) apresentaram um MAS para trabalhar as operações de terminal de contêiner baseado na Arquitetura Harvard. Zhao e Cheng (2009) utilizaram a estratégia de agendamento coordenado para alocação de berço e guindastes baseada em um MAS sendo o processo de agendamento baseado na interação entre os agentes. Yin *et al.* (2011) descreveram um MAS para alocação e planejamento dinâmico de portos. Os agentes comunicam e cooperam entre si com o objetivo de organizar a alocação de berço. O artigo conduz um estudo de caso para ilustrar a capacidade do sistema de agentes distribuídos, onde é mostrado que o sistema proposto é capaz de gerar programações tanto para o agente de controle de berço quanto para o agente de alocação de transporte. Sun *et al.* (2013) utilizaram um MAS visando gerar um plano operacional do terminal para a alocação de guindastes de cais. Yan e Zhou (2013) estabeleceram modelos de alocação de berço e guindastes para operação de um terminal de contêiner. Yan *et al.* (2013) apresentaram uma abordagem MAS prática para solucionar o problema de alocação de berço e designação de guindaste em um terminal de contêineres multiusuário.

3. DESCRIÇÃO DO MAS PROPOSTO

No MAS proposto, os agentes são autônomos e negociam entre si com base em protocolos de negociação definidos neste mesmo ambiente, visando obter uma solução global do problema. Os agentes foram desenvolvidos para serem distribuídos entre computadores ligados em rede e se comunicar em tempo real com o mundo externo, seres humanos e empresas, que fazem interface com ele. Para tanto, foi escolhido o ambiente para desenvolvimento de agentes *Distributed Environment Centered Agent Framework* (DECAF), Figura 1, (GRAHAM, 2001). O DECAF utiliza o protocolo de comunicação *Knowledge Query and Manipulation Language* (KQML) para troca de mensagens. Todos os agentes foram desenvolvidos em linguagem Java.

3.1. Modelagem Computacional dos Agentes

O MAS proposto descreve o sistema multiagentes como uma n-upla (A, R, S, M, F, E). Nesta n-upla o A representa o conjunto de todos os agentes do sistema, o R representa o conjunto de todos os recursos do sistema, o S representa o conjunto de todas as solicitações recebidas pelo sistema, o M representa o conjunto de todas as mensagens recebidas e enviadas pelos agentes para negociar entre si, o F representa o conjunto das agendas de todos os recursos referente a todas as solicitações do sistema e o E representa as emoções registradas.

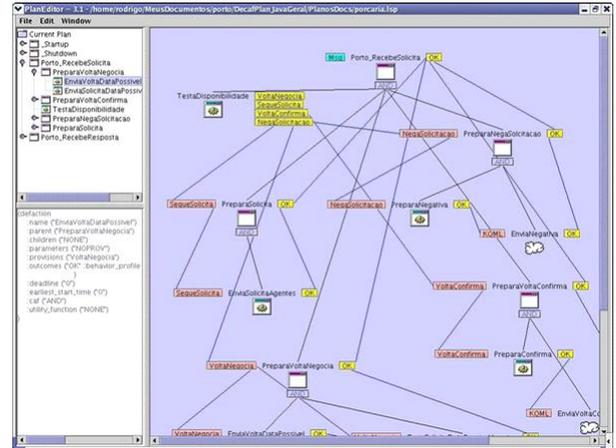


Figura 1. Ambiente DECAF para desenvolvimento de agentes

Assim, os agentes do MAS possuem: 1) recursos próprios, 2) solicitações recebidas, 3) mensagens recebidas e enviadas pelos agentes para negociar entre si, 4) um conjunto das agendas de cada um dos seus recursos e 5) As emoções registradas em relação a todos os agentes que ele se relaciona.

O sistema computacional propõe um conjunto único de classes que representem todos os agentes do sistema multiagentes e que a diferença entre cada agente seja estabelecida por meio de arquivos de parâmetros lidos quando o agente é inicializado. Assim sendo, foi desenvolvido um agente padrão que recebe e envia somente dois tipos de mensagem: 1) Solicitação e 2) Resposta. Para criar o agente padrão, estabeleceram-se: 1) Um plano padrão para recebimento e envio das mensagens (Figura 2) e 2) Um conjunto de classes escritas em Java para suportar as ações do agente.

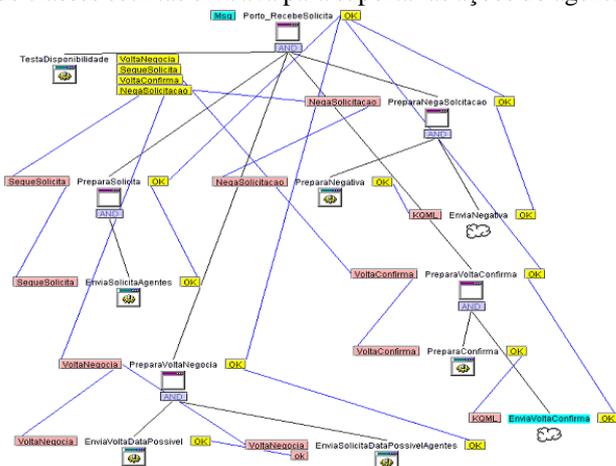


Figura 2. Plano DECAF parcial para tratar o recebimento da mensagem de Solicitação

O plano padrão foi desenvolvido no DECAF e nele são descritos todos os possíveis métodos para recebimento e tratamento das mensagens. As mensagens são os únicos meios dos agentes atuarem no sistema multiagentes. A mensagem do tipo Solicitação é única e padrão e tem como função receber todos os dados sobre a solicitação. Basicamente, em qualquer sistema de agendamento devem ser informados os seguintes dados: 1) Número da solicitação e 2) Dados da carga. Por exemplo: quantidade, peso, tamanho e volume; 3) Data/hora estimada de chegada e 4) Número es-

timado de horas de operação. As mensagens do tipo Resposta possuem quatro subtipos possíveis: 1) Sugestão; 2) Confirmação; 3) Negativa e 4) Gratidão.

As mensagens do subtipo Sugestão são usadas quando o agente não consegue atender à solicitação na data solicitada e, conforme seus recursos e sua agenda ele define uma data mais próxima e posterior à solicitada que gere o menor impacto para sua agenda. Neste ponto, ele avisa a todos os solicitados e ao solicitador esta nova sugestão de data. As mensagens são compostas dos seguintes dados: 1) Tipo da mensagem; 2) Número da solicitação e 3) Data/hora sugerida. As mensagens do subtipo Confirmação são usadas quando o agente consegue negociar com todos seus solicitados uma data comum para atendimento a solicitação e retorna para o solicitador a confirmação da data solicitada. A mensagem é composta dos seguintes dados: 1) Tipo da mensagem e 2) Número da solicitação.

As mensagens do subtipo Negativa são usadas quando nenhum recurso que o agente possui tem as características mínimas para atender à solicitação, independente da data solicitada. Cita-se como exemplo um navio com comprimento maior do que o maior berço disponível para os navios no porto. A mensagem é composta dos seguintes dados: 1) Tipo da mensagem e 2) Número da solicitação. Todos os agentes que recebem uma mensagem do subtipo Negativa param a negociação imediatamente. Com exceção desta situação, os agentes sempre propõem uma nova data posterior à data solicitada. As mensagens do subtipo Gratidão servem para enviar os valores dos favores prestados. A mensagem é composta dos seguintes dados: 1) Tipo da mensagem e 2) Valor dos favores prestados.

A interface que encapsula o conjunto de classes implementada é denominada de Interface do Agente Geral e é a base de todos os agentes do sistema.

3.2. Funcionamento da Abordagem Proposta

O agente ao nascer, isto é, ao ser inicializado, no sistema multiagentes virtual contém as seguintes informações:

1. Um conjunto de regras que estabelece o que é o seu objetivo e como ele deve negociar para alcançar estes objetivos;
2. Uma tabela de relacionamentos (*acquaintances*). Esta tabela contém os outros agentes do sistema multiagentes com os quais o agente se relaciona. Assim sendo, o agente sabe de quais agentes ele pode receber solicitações e para quais agentes ele necessita solicitar serviços e recursos a fim de realizar suas tarefas;
3. Um conjunto de recursos próprios.

Para efeito de definição desta abordagem, considera-se o mundo como o ambiente virtual onde estão situados os agentes, ou seja, o próprio sistema multiagentes e o mundo externo como sendo o mundo real onde vivem os seres humanos e as empresas que podem fazer solicitações ao sistema multiagentes. Todas as solicitações que vêm do mundo externo necessitam de diversos recursos e serviços. Não existe, a priori, um agente que possua todos os recursos e serviços necessários para resolver sozinho uma solicitação e, assim sendo, para que a solicitação seja atendida é necessário que diversos agentes atuem em conjunto fornecendo seus produtos e serviços a fim de realizar a solicitação. Para que seja possível encontrar uma data única e comum a todos

os agentes, deverá ocorrer entre os agentes um processo de negociação. Em relação ao sistema multiagentes proposto, define-se que ele pode estar em dois estados:

1. Equilíbrio. Este estado ocorre quando todas as solicitações ao sistema multiagentes estão agendadas/reservadas para uma data única e comum a todos os agentes que necessitam fornecer recursos e serviços para a solicitação;
2. Desequilíbrio. Este estado ocorre quando pelo menos uma solicitação não tenha sido agendada numa data única e comum a todos os agentes necessários para sua realização. Isto implica dizer que os agentes ainda não concluíram o processo de negociação.

O sistema multiagentes terá como base de seu funcionamento a mudança constante de estados. Isto é, sempre que o sistema multiagentes estiver no estado de Equilíbrio e receber uma nova solicitação do mundo externo, ele muda para o estado de Desequilíbrio. O sistema multiagentes inicialmente encontra-se no estado de Equilíbrio, pois não há nenhuma solicitação do mundo externo. Ao mudar para o estado de Desequilíbrio, os agentes começam a negociar entre si e à medida que a negociação avança, o sistema vai voltando para o estado de Equilíbrio, sendo este alcançado quando é encontrada uma data única e comum a todos os agentes envolvidos em resolver a solicitação. Quando esta data é encontrada, o sistema retorna para o estado de Equilíbrio. Este processo é dinâmico, pois sempre estão chegando novas solicitações, ou as já agendadas são alteradas, e, portanto, a abordagem funciona sempre mudando para o estado de Desequilíbrio e, por meio da negociação, retorna ao estado de Equilíbrio.

Ao receber uma solicitação de serviço, o agente verifica quais recursos pode dispor para atender à solicitação na data solicitada. Para verificar se ele possui os recursos, ele analisa, para cada recurso, a possibilidade de atender na data solicitada sem impactar os navios já agendados, este recurso é então reservado para atender à solicitação. Caso todos os recursos não estejam disponíveis na data solicitada, então é feita a análise em qual data existem todos os recursos necessários para operação. É realizada, também, a análise do impacto em termos do número de navios que terão suas datas previamente agendadas alteradas e a soma dos tempos de cada alteração desta agenda. O recurso que sofrer o menor impacto terá sua agenda alterada para acomodar a nova solicitação. Como visto, o sistema é dinâmico e em tempo real e, cada agente não resolve um modelo matemático do tipo BAP, QCAP e YMS, mas sim uma análise da sua agenda. Desta forma, o tempo computacional fica muito reduzido para reprogramar as agendas dos agentes e aceitar a data sugerida ou propor uma nova data.

Deve-se ressaltar que caso o agente não possua recursos que possam atender à solicitação, i.e., calado do navio maior que a profundidade do porto, boca do navio maior que o máximo permitido pelo porto, entre outras, o agente enviará uma mensagem do tipo Negativa e interromperá imediatamente a negociação, liberando a agenda de todos os outros agentes que estavam no processo de negociação para a atracação do navio. Outra situação é que, como explicitado anteriormente, pode ser definido um tempo máximo para negociação entre os agentes e caso esse tempo

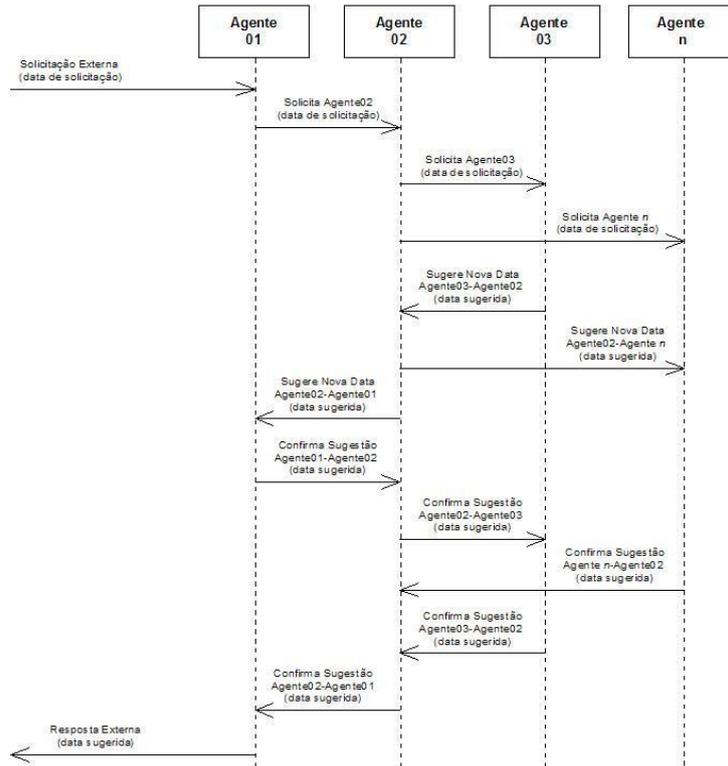


Figura 3. Estado 3 - Situação 1 e retorno de resposta negação de pelo menos um solicitado

seja excedido, então o agente envia uma mensagem Negativa. Em ambos os casos a negociação é interrompida.

O agente ao receber a solicitação analisa se é possível atender na data solicitada. Desta análise, duas situações podem ocorrer:

1. Pode atender na data solicitada: reserva seus recursos para a data solicitada e solicita aos outros agentes que façam a reserva dos recursos necessários para a execução da solicitação. Estes agentes aos quais ele necessita solicitar recursos estão descritos na sua tabela de relacionamentos (*acquaintances*);
2. Não pode atender na data solicitada: verifica uma data que seja possível atender com seus recursos e com esta nova data sugerida ele reserva seus recursos para esta data e solicita aos outros agentes que façam a reserva dos recursos necessários para a execução da solicitação na nova data e envia, também, ao solicitador uma mensagem de sugestão da nova data. Estes agentes aos quais ele necessita solicitar recursos estão descritos na sua tabela de relacionamentos.

Após o agente ter enviado as solicitações e, quando for o caso, a mensagem de sugestão para o solicitador com a nova data, ele fica aguardando a resposta dos agentes aos quais ele enviou mensagem. Em função das respostas recebidas e das duas situações descritas anteriormente, podem ocorrer cinco estados possíveis.

1. Situação 1 e todos os agentes solicitados responderem confirmando a solicitação: o agente retorna ao solicitador, agente ou mundo externo, e aos agentes solicitados confirmando a data anteriormente solicitada;

2. Situação 2 e todos os agentes solicitados e o solicitador responderem confirmando a solicitação: o agente retorna ao solicitador, agente ou mundo externo, e aos agentes solicitados confirmando a data anteriormente solicitada;
3. Situação 1 e o retorno de pelo menos um agente solicitado informando que não pode atender na data solicitada e enviando uma sugestão de uma nova data posterior à data solicitada: o agente aceita esta data posterior como a data possível e retorna a todos os solicitados e para o solicitador uma sugestão para esta nova data e fica no aguardo da confirmação por todos da possibilidade de atendimento nesta nova data (Figura 3);
4. Situação 2 e o retorno pelo solicitador informando que não pode aceitar a data solicitada e enviando uma sugestão de uma nova data posterior à data solicitada: o agente aceita esta data posterior como a data possível e retorna a todos os solicitados uma sugestão para esta nova data e fica no aguardo da confirmação por todos da possibilidade de atendimento nesta nova data;
5. Situação 2 e o retorno de pelo menos um agente solicitado informando que não pode atender na data solicitada e enviando uma sugestão de uma nova data posterior à data solicitada: o agente aceita esta data posterior como a data possível e retorna a todos os solicitados e para o solicitador uma sugestão para esta nova data e fica no aguardo da confirmação por todos da possibilidade de atendimento nesta nova data.

Como pode ser observado nos estados 3, 4 e 5, o retorno nestas condições gera um novo estado de Desequilíbrio e força a negociação entre os agentes a prosseguir até que se consiga chegar ao estado de Equilíbrio.

O protocolo de negociação com Grau de Gratidão proposto neste artigo funciona como uma conta corrente dentro do agente. Nesta conta corrente são registrados os esforços que ele realizou para atender determinado agente e, também, são registrados os esforços que o outro agente fez para atendê-lo. A subtração do valor da ajuda recebida do outro agente menos o valor da ajuda prestada ao outro agente será o valor do Grau de Gratidão. A situação na qual o Grau de Gratidão é muito próximo ou igual a zero, representa o equilíbrio emocional do ser humano transposto para o sistema artificial e é o ponto ideal, onde todos ajudam e são ajudados, trazendo, assim, para o sistema multiagentes o conceito de cooperação (HAIDT, 2003; ROSA, 2006).

3.3. MAS Proposto para a Operação Portuária

Na Figura 4 são apresentados os agentes que compõem a sociedade virtual que representa o porto marítimo: Administração do Porto (*Adm*); Berço de Atracação (*Berco*); Área de Pátio (*Patio*); Equipamentos (*Equipa*).

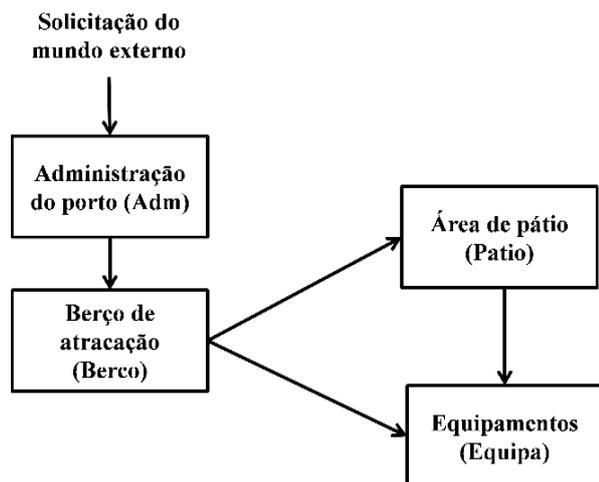


Figura 4. Agentes da sociedade virtual (porto marítimo)

Da Figura 4, é possível definir tabela de *acquaintances* de cada agente conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Tabela de *acquaintances* de cada agente.

Agente	Agentes que ele solicita	Agentes que ele se relaciona
<i>Adm</i>	<i>Berço</i>	<i>Berço</i>
<i>Berço</i>	<i>Patio</i>	<i>Adm</i>
	<i>Equipa</i>	<i>Patio</i>
	-	<i>Equipa</i>
<i>Patio</i>	<i>Equipa</i>	<i>Berço</i>
		<i>Equipa</i>
<i>Equipa</i>	-	<i>Berço</i>
		<i>Equipa</i>

Na criação dos agentes estabeleceu-se que cada agente é responsável por um conjunto de recursos de um mesmo tipo e fica ao seu encargo elaborar a alocação deles às solicitações recebidas. Com isso, reduz-se muito a possibilidade de explosão combinatorial e diminui muito a negociação entre eles. Isso ocorre devido ao fato de quando houver necessidade de um recurso, basta solicitar a um único responsável pelo conjunto de recursos do mesmo tipo. O

agente *Adm* tem por função principal receber solicitações do mundo externo. O agente *Berco* é responsável por todos os berços de atracação, conhecendo suas características e suas agendas de utilização. Ele sabe que para o berço agendado funcionar, quando o navio atracar, devem estar disponíveis equipamentos para realizar a operação de carga e descarga do navio, bem como áreas de pátio para que os contêineres sejam levados. Assim, ele deve negociar com o agente *Patio* e o agente *Equipa* a fim de se chegar a uma data de consenso para atender à solicitação de atracação.

O agente *Patio* ao receber o pedido do agente *Berco* analisa se é possível agendar os recursos para a data solicitada. Se for possível, ele reserva a área no pátio. Caso contrário, ele responde ao agente *Berco* uma sugestão de uma data mais próxima à solicitada e que ele pode atender. O agente *Patio* sabe que para o pátio funcionar, quando o navio atracar, devem estar disponíveis equipamentos para realizar a operação de empilhamento e recuperação de contêineres do pátio. Assim, ele deve negociar com o agente *Equipa* a fim de se chegar a uma data de consenso para atender à solicitação. Por sua vez, o agente *Equipa* sabe que para ele funcionar, ele não necessita fazer solicitações a outros agentes.

O navio pode mudar sua Data Estimada de Chegada (ETA) a qualquer momento e, além disso, outros navios podem chegar à sua frente, tendo que elaborar outro agendamento de todos os recursos em função da alteração das ETA, tornando ainda mais complexo o problema, pois é necessário realizar o agendamento dos recursos em tempo real.

4. METODOLOGIA

Tendo em vista que o MAS proposto implementa um ambiente dinâmico, onde novas solicitações chegam em tempo real e alterações na alocação precisam ser feitas também em tempo real, buscou-se um ambiente que melhor representasse essa situação. Assim, foi desenvolvido um modelo de simulação discreta de eventos que foi denominado Modelo de Referência. A escolha por um modelo de simulação se deve ao fato de que este tipo de modelo é o que mais se aproxima do MAS proposto, pois incorpora as questões de ser dinâmico e estocástico, no entanto, não funciona em tempo real e não apresenta a programação dos recursos do porto.

O Modelo de Referência, Figura 5, foi elaborado com base em dados operacionais da operação portuária do TPD no software de simulação Arena (KELTON, 2006). O modelo é constituído de um módulo *create GeraNavios* onde as entidades navios são criadas conforme as regras de distribuição de probabilidade apresentadas a seguir, depois existem quatro módulos *seize* para, respectivamente, reservar o recurso berço, área de pátio, equipamentos do berço e equipamentos do pátio, e depois que for possível reservar todos os recursos existe um outro módulo *process OperaNavio* que efetivamente simula a operação do navio com um tempo representado pela curvas de probabilidade descritas a seguir. Em seguida, existem quatro módulos *release* que liberam os recursos previamente reservados e, por fim, tem-se um módulo *dispose FimOperação* que libera a entidade navio do sistema.

No intuito de se avaliar os resultados alcançados pela abordagem proposta, foram criados 25 cenários de teste que

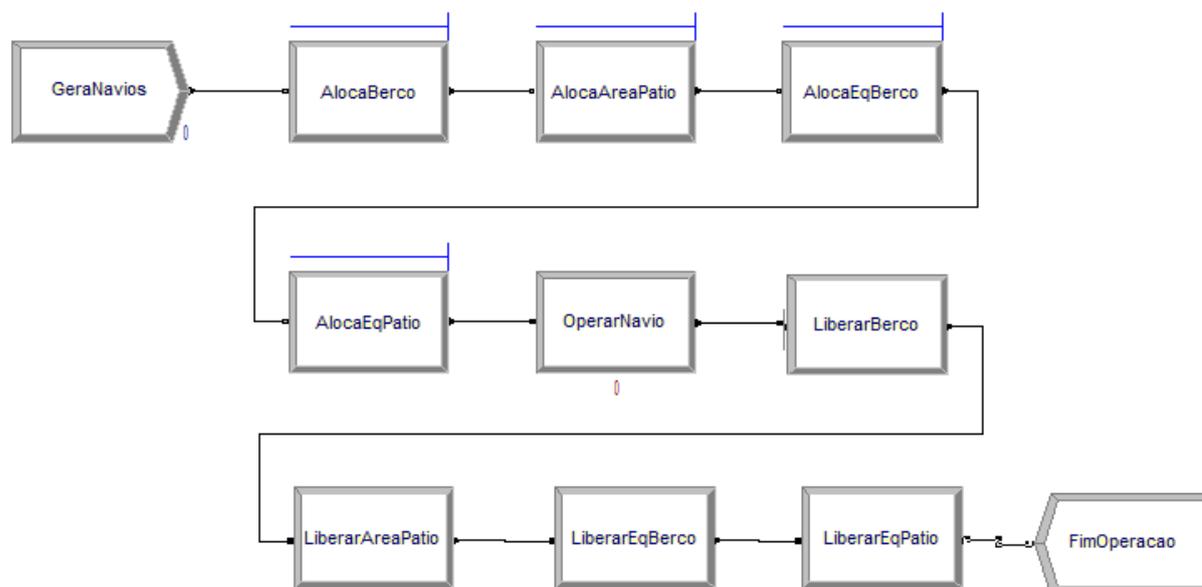


Figura 5. Modelo de Referência - Arena

Tabela 2. Cenários de Teste para o MAS Proposto

Cenários	Porto – Número de Berços (un)	Número de Solicitações de Atração	Sequência de Chegada Distribuição	Tempo de operação Distribuição Normal	
		(um)	Exponencial Tempo Médio entre Navios (h)	Médio (h)	Desvio Padrão (h)
1	1	200	6	18	6
2	1	200	6	36	12
3	1	200	12	18	6
4	1	200	12	36	12
5	3	200	6	18	6
6	3	200	6	36	12
7	3	200	12	18	6
8	3	200	12	36	12
9	5	200	6	18	6
10	5	200	6	36	12
11	5	200	12	18	6
12	5	200	12	36	12
13	3	500	6	18	6
14	3	500	6	36	12
15	3	500	12	18	6
16	3	500	12	36	12
17	5	500	6	18	6
18	5	500	6	36	12
19	5	500	12	18	6
20	5	500	12	36	12
21	5	1000	6	18	6
22	5	1000	6	36	12
23	5	1000	12	18	6
24	5	1000	12	36	12
25	5	1000	3	36	12
26	3	12	27	14	2
27	3	17	38	10	3

visam testar diferentes situações de trocas de mensagens, sobretudo, em ambientes MAS com alto volume de negociação. As características dos cenários são as seguintes: 1) Tamanho do porto; 2) Frequência de chegada de navios ao porto; 3) Tempo de operação de cada navio.

Como característica do tamanho do porto, foram usadas três configurações de berço de atracação: 1) Um berço, cenário bem restritivo; 2) Três berços (cenário atual); 3)

Cinco berços. Para as três características do tamanho do porto, foram geradas as datas de chegada de navios com base em uma distribuição exponencial. Foram geradas três sequências com as seguintes características da distribuição exponencial: 1) Com média de tempo entre dois navios igual a seis horas; 2) Com média de tempo entre dois navios igual a 12 horas; 3) Com média de tempo entre dois navios igual a 3 horas. A sequência 3 é usada somente no Cenário

25 com o objetivo de testar uma saturação muito grande de chegada de navios ao porto, porém, pode-se afirmar que esta situação não ocorre em um porto comercial, mas, faz-se necessário avaliar o limite de capacidade do MAS proposto.

Para todas as sequências foram gerados os tempos de operação de cada solicitação baseados numa distribuição normal. Para tal, foram gerados dois tempos de operação seguindo as seguintes características da distribuição normal: 1) Com média de tempo de operação de 18 horas e com desvio padrão de 6 horas; 2) Com média de tempo de operação de 36 horas e com desvio padrão de 12 horas.

Além dos 25 cenários de teste, foram definidos mais dois cenários de teste que se aproximam mais da realidade do TPD. No Cenário 26, foram considerados 3 berços, chegada dos navios respeitando uma distribuição exponencial com média de tempo entre dois navios igual a 27 horas e tempo de operação respeitando a distribuição normal com média de tempo de operação de 14 horas e com desvio padrão de 2 horas. No Cenário 27, foram considerados 3 berços, chegada dos navios respeitando uma distribuição exponencial com média de tempo entre dois navios igual a 38 horas e tempo de operação respeitando a distribuição normal com média de tempo de operação de 10 horas e com desvio padrão de 3 horas.

Os 27 cenários foram igualmente testados no MAS proposto e no Modelo de Referência. Para todos os 27 cenários, foi estabelecido um limite máximo de 24 horas entre a data de solicitação de atracação e a data possível de atracação. Isso se deve ao fato que navios de contêineres realizam contratos de operação com o porto com uma janela de atracação de no máximo 24 horas. Caso não seja possível atender dentro deste limite, o navio não será agendado para operar no porto e, portanto, não irá entrar na fila de navios. A Tabela 2 apresenta os 27 cenários.

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram realizadas dez execuções para cada um dos 25 cenários, pois os resultados dos testes não são determinísticos. Os resultados dos protocolos propostos foram comparados com os resultados obtidos pelo Modelo de Referência. Para análise dos resultados, foram definidas três métricas: 1) tempo médio de espera para atracar no porto de todos os navios, que avalia o tempo entre a data de solicitação de atracação e a data de atracação; 2) Número de solicitações não atendidas, que mede a capacidade do sistema de agendar o máximo possível de navios respeitando o limite máximo de 24 horas entre a data de solicitação de atracação e

a data possível de atracação; 3) Número de mensagens realizadas que representa o número total de mensagens e indica o esforço do MAS proposto para chegar à solução final.

São apresentados a seguir os resultados dos Cenários 6 e 14 (Tabelas 3 e 4), pois eles possuem 3 berços, o que mais se assemelha ao porto estudado, e possuem o menor intervalo entre chegadas de navio e o maior tempo de operação conforme a Tabela 2. O Cenário 25 (Tabelas 5) também é analisado visando ver o comportamento do MAS proposto. Os demais resultados são analisados globalmente.

Em relação ao tempo de espera para atracar no porto de todos os navios, os dois protocolos de negociação propostos se aproximam muito do valor do Modelo de Referência e possuem uma variabilidade muito próxima ao mesmo. Esta variabilidade, medida pelo desvio padrão, tanto no Modelo de Referência como nos dois protocolos propostos, é causada pela distribuição exponencial que gera valores mais perto um dos outros no início e valores mais espaçados no fim da distribuição. Outro fato importante é que os dois protocolos de negociação obtiveram resultados semelhantes entre si e o Modelo de Referência, independente do número de solicitações e, conforme visto anteriormente, só é afetado pelas mesmas condições do Modelo de Referência.

Quanto ao número de solicitações não atendidas, situação imposta pelo limite de 24 horas para os testes, os dois protocolos de negociação alcançaram em todos os testes valores iguais aos encontrados pelo Modelo de Referência, inclusive numa análise feita por cada execução, o número de solicitações foi sempre o mesmo. A variabilidade é igual em todos os testes para o Modelo de Referência e para os dois protocolos propostos. Ela é ocasionada em função dos dados de entrada serem diferentes nas dez execuções.

O número de mensagens realizadas para os dois protocolos propostos, em valores absolutos, apresenta valores que chegam ao máximo de 22.395 para o cenário 25 com 1.000 solicitações, o que aparentemente é um valor alto. No entanto, pode-se perceber que para cada solicitação, o MAS deve gerar uma mensagem de solicitação do agente *Adm* para o agente *Berco*, uma mensagem de solicitação do agente *Berco* para o agente *Patio*, uma mensagem de solicitação do agente *Berco* para o agente *Equipa* e uma mensagem de solicitação do agente *Patio* para o agente *Equipa*. Além disso, para cada uma destas quatro mensagens, deve-se ter uma mensagem de confirmação de atendimento à solicitação, portanto mais quatro mensagens. Então, para cada solicitação, no mínimo oito mensagens devem ocorrer. Assim, para os cenários onde ocorre muita negociação é de se esperar que o valor do número de mensagens realizadas aumente. No entanto, em todos os testes realizados, os dois protocolos propostos convergiram para o resultado final.

Tabela 3. Resultados do Cenário 6

Critério de Agendamento	Tempo de Espera para Atracar no Porto		Número de Solicitações Não Atendidas		Número de Mensagens Realizadas	
	Média (h)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão
Modelo de Referência	8,8	1,1	96,1	0,2	-	-
1-Com a possibilidade de descolar em função da data de chegada	9,1	1,3	96,1	0,2	2724,8	34,1
2-Com a possibilidade de descolar em função da data de chegada usando como critério de desempate a emoção	9,2	1,4	96,1	0,2	3421,4	40,7

Tabela 4. Resultados do Cenário 14

Critério de Agendamento	Tempo de Espera para Atracar no Porto		Número de Solicitações Não Atendidas		Número de Mensagens Realizadas	
	Média (h)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão
Modelo de Referência	9,5	1,3	243,8	0,9	-	-
1-Com a possibilidade de descolar em função da data de chegada	9,6	1,3	243,8	0,9	8673,4	68,4
2-Com a possibilidade de deslocar em função da data de chegada usando como critério de desempate a emoção	10,4	1,7	243,8	0,9	9996,4	108,1

Tabela 5. Resultados do Cenário 25

Critério de Agendamento	Tempo de Espera para Atracar no Porto		Número de Solicitações Não Atendidas		Número de Mensagens Realizadas	
	Média (h)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão
Modelo de Referência	9,9	1,1	577,7	1,4	-	-
1-Com a possibilidade de descolar em função da data de chegada	10,4	1,7	577,7	1,4	16130	178,4
2-Com a possibilidade de deslocar em função da data de chegada usando como critério de desempate a emoção	12,1	2,1	577,7	1,4	19122	196,5

Aliado a isso, deve-se ressaltar que com exceção das mensagens de solicitações, todas as outras mensagens são formadas por poucos caracteres, a de confirmação possui somente o código da solicitação, três caracteres, a de sugestão possui o código da solicitação e a data sugerida, onze caracteres. Portanto, o impacto delas no sistema não é grande e, em contrapartida, se ganha na distribuição dos processos em diversas máquinas, o que não ocorre no Modelo de Referência.

Para analisar o tempo de execução do MAS proposto, primeiramente, deve ser destacado que este tempo é muito aleatório, pois ele depende da velocidade da rede de dados por onde os agentes se comunicam, da capacidade de processamento de cada máquina, da sequência que as mensagens chegam aos agentes, pois o protocolo TCP/IP não garante que a primeira mensagem enviada é a primeira chegar, dependendo por onde a mensagem foi roteada, entre outros fatores. Outro fator que impacta o tempo diferentemente do Modelo de Referência, simulação, no ambiente MAS é que há um gerador de mensagens que vai gerando em tempos aleatórios as solicitações, o que dificulta muita a apuração do tempo de execução de cada rodada.

Numa análise dos tempos de execução do MAS proposto, pôde-se perceber que para as instâncias de teste, Cenários de 1 a 25, o número de berços praticamente não afetou o tempo de processamento, que foram muito próximos nos cenários que tinham o mesmo intervalo de chegada de navio e o mesmo tempo de operação, porém só variavam os

berços. O que mais impactou o tempo de execução foi o intervalo de chegada dos navios. Pela análise dos dados, intervalos de chegada muito próximos levaram a mais mudanças para chegar a um consenso via negociação da data de atracação de navios e da decisão de qual navio deverá ser atracado ou não. A quantidade de solicitações, por razões óbvias também afeta o tempo de execução do MAS, quanto maior o número de solicitações, maior o tempo de execução. O tempo de operação também alterou os tempos de execução, porém de maneira menos significativa. Por fim, o menor tempo de execução ocorreu no Cenário 3 onde havia o maior intervalo de chegada entre navios e o tempo de operação era o menor e também tinha o menor número de solicitações. Em contrapartida, o pior tempo de execução, como era de se esperar, foi o Cenário 25, que levou 476,54 minutos em média para executar o MAS. Porém, tem que se ressaltar que este cenário teve o menor intervalo de chegada de navios, o maior número de solicitações e o maior tempo de operação.

Após a análise dos 25 cenários, será apresentado a seguir a análise dos Cenários 26 e 27, mais próximos da realidade do porto. Para tanto, os resultados alcançados são apresentados na Tabela 6 e 7, respectivamente, Cenário 26 e Cenário 27.

Analisando as Tabelas 6 e 7, pode-se observar que nas situações que são mais próximas da realidade do porto, o MAS proposto é executado, para todos os navios, em um tempo muito baixo, 3,52 e 3,76 min, respectivamente, para os Cenários 26 e 27. Vale ressaltar que neste tempo já está

Tabela 6. Resultados do Cenário 26

Critério de Agendamento	Tempo Médio de Execução (min)	Tempo de Espera para Atracar no Porto		Número de Solicitações Não Atendidas		Número de Mensagens Realizadas	
		Média (h)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão
Modelo de Referência	2,08	0,2	0,1	0,0	0,0	-	-
1-Com a possibilidade de descolar em função da data de chegada	3,52	0,1	0,0	0,0	0,0	743,4	4,1
2-Com a possibilidade de deslocar em função da data de chegada usando como critério de desempate a emoção	5,09	0,1	0,0	0,0	0,0	1432,4	6,2

Tabela 7. Resultados do Cenário 27

Critério de Agendamento	Tempo Médio de Execução (min)	Tempo de Espera para Atracar no Porto		Número de Solicitações Não Atendidas		Número de Mensagens Realizadas	
		Média (h)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão	Média (Um)	Desvio Padrão
Modelo de Referência	2,01	0,2	0,1	0,0	0,0	-	-
1-Com a possibilidade de descolar em função da data de chegada	3,76	0,1	0,0	0,0	0,0	503,1	2,1
2-Com a possibilidade de deslocar em função da data de chegada usando como critério de desempate a emoção	4,19	0,1	0,0	0,0	0,0	1117,7	5,8

computado o tempo aleatório de geração das solicitações. Pode-se perceber também que o sistema é estável, apresentando pequenos desvios padrão em todas as execuções.

Os resultados do protocolo 2, Grau de Gratidão, reforçam a ideia que sua maior virtude não é melhorar resultados, mas, sim, ser um elemento de desempate em conflitos que possam ocorrer em um ambiente de negociação. Nos cenários 1 a 25, os dois protocolos propostos se apresentam de forma estável nos testes, podendo ser, ambos, alternativas interessantes para resolução desta classe de problema, alcançando, inclusive, resultados muito próximos aos alcançados pelo Modelo de Referência, que utiliza as técnicas de simulação que atualmente são bastante difundidas no setor portuário. No entanto, vale ressaltar que o Modelo de Referência não é adequado para se tornar uma ferramenta de tomada de decisão, pois não explicita exatamente quais as ações devem ser tomadas ao longo do tempo pela gestão do porto. Em contrapartida, o ambiente MAS proposto neste artigo se apresenta como uma ferramenta de apoio à gestão da operação portuária em tempo real de forma totalmente integrada, sob a ótica dos berços, equipamentos, pátios, e designando cada recurso do porto a cada navio que irá operar no porto, bem como, buscando reduzir o tempo total de permanência de todos os navios nos portos.

6. CONCLUSÕES

O MAS proposto alcançou bons resultados quando comparado com o Modelo de Referência. Vale ressaltar que os resultados alcançados não tiveram qualquer interferência humana e, apesar das incertezas inerentes a um sistema distribuído, o MAS se mostrou estável nas diversas repetições dos testes e convergiu sempre para o resultado.

Assim, o MAS proposto é capaz de resolver os problemas de agendamento dos recursos do porto, i.e., berços, áreas de pátio e equipamentos, de forma distribuída e em tempo real por meio da negociação entre os agentes levando a um resultado global que considera de forma integrada todas as necessidades do navio para atracar no porto. A resolução do BAP, QCAP e YSM separadamente não leva em conta a inter-relação entre os problemas, podendo levar, eventualmente, a um resultado que não seja o melhor para o porto.

Vale ressaltar que muitos dos métodos centralizados e de abordagem matemática nem sempre conseguem resolver os problemas dinâmicos em ambientes complexos. Nestes ambientes a informação para a solução do problema não se apresenta de forma completa e sempre está sendo alterada, que é o caso de um porto, o que dificulta, sobremaneira, a solução pelos métodos matemáticos citados. Já no

caso do MAS proposto, como a solução emana da negociação e da troca de propostas e contrapropostas entre os agentes, os mesmos não precisam das informações globais e podem ir se adaptando ao longo do tempo e se ajustando às modificações, refazendo dinamicamente a fila de navios assim que um navio informe a alteração de sua data de chegada ao porto.

AGRADECIMENTOS

À FAPES (458/2013) e ao CNPq (477148/2011-5) pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Barros, V. H., Costa, T. S., Oliveira, A. C. M., Lorena, L. A. N. (2011) Model and Heuristic for Berth Allocation in Tidal Bulk Ports with Stock Level Constraints. *Computers & Industrial Engineering*, v. 60, n. 4, p. 606-613. DOI: 10.1016/j.cie.2010.12.018
- Bierwirth, C., Meisel, F. (2010) A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, v. 202, n. 3, p. 615-627. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.05.031
- Bierwirth, C., Meisel, F. (2009) A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints. *Journal of Scheduling*, v. 12, n. 4, p. 345-360. DOI: 10.1007/s10951-009-0105-0
- Chen, C. S., Lee, S. M., Shen, Q. S. (1995) An analytical model for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, v. 80, n. 1, p. 68-76. DOI: 10.1016/0377-2217(94)00002-T
- Chen, C. Y., Chao, S. L., Hsieh, T. W. (2000) A time-space network model for the space resource allocation problem in container marine transportation. In: *Proceedings of 17th international symposium on mathematical programming*. Atlanta, USA.
- Cheung R. K., Chen C. Y. (1998) A two-stage stochastic network model and solution methods for the dynamic empty container allocation problem. *Transportation Science*, v. 32, n. 2, p. 142-162. DOI: 10.1287/trsc.32.2.142
- Cordeau, J. F., Laporte, G., Legato, P., Moccia, L. (2005) Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem. *Transportation Science*, v. 39, n. 4, p. 526-538. DOI: 10.1287/trsc.1050.0120
- Crainic T. G., Gendreau, M., Dejax, P. (1993) Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers. *Operations Research*, v. 41, n. 1, p. 102-126. DOI: 10.1287/opre.41.1.102

- Golias, M., Boile, M., Theofanis, S. (2007) The stochastic berth allocation problem. In: Proceedings of the International Conference on Transport Science and Technology (TRANSTEC 2007). Czech Technical University, Prague, pp. 52–66.
- Graham, J. R. (2001) Real-Time Scheduling In Distributed Multi Agent Systems. PhD Thesis, University of Delaware.
- Haidt, J. (2003) The Moral Emotions. In Davidson, R., Scherer, K., Goldsmith, H., (orgs.) Handbook of Affective Sciences, Oxford University Press. NY, USA.
- Han, M., Li, P., Sun, J. (2006) The algorithm for berth scheduling problem by the hybrid optimization strategy GASA. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'06). IEEE Computer Society, Washington DC, p. 1–4. DOI: 10.1109/ICARCV.2006.345455
- Hansen, P., Oguz, C., Mladenovic, N. (2008) Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation. *European Journal of Operational Research*, v. 191, n. 3, p. 636–649. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.12.057
- Imai, A., Chen, H. C., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2008) The simultaneous berth and quay crane allocation problem. *Transportation Research Part E*, v. 44, n. 5, p. 900–920. DOI:10.1016/j.tre.2007.03.003
- Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2001) The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research Part B*, v. 35, n. 4, p. 401–417. DOI: 10.1016/S0191-2615(99)00057-0
- Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2003) Berth allocation with service priority. *Transportation Research Part B*, v. 37, n. 5, p. 437–457. DOI: 10.1016/S0191-2615(02)00023-1
- Kelton, D. (2006) Simulation with Arena (4^a ed.). McGrawHill, New York, USA.
- Kim, K. H., Bae, J. W. (1998) Re-marshaling export containers in port container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, v. 35, n. 3-4, p. 655–658. DOI: 10.1016/S0360-8352(98)00182-X
- Kim, K. H., Park, K. T. (2003) A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers. *European Journal of Operation Research*, v. 148, n. 1, p. 92–101. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00333-8
- Kim, K. H., Park, Y. M., Ryu, K. R. (2000) Deriving decision rules to locate export containers in storage yards. *European Journal of Operations Research*, v. 124, n. 1, p. 89–101. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00116-2
- Li, B., Yan, X. (2010) Berth allocation problem with Harvard architecture and agent-based computing. In: International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). IEEE, Taiyuan, v. 1, p. 197-201. DOI: 10.1109/ICCASM.2010.5619336
- Lokuge, P., Alahakoon, D. (2007) Improving the adaptability in automated vessel scheduling in container ports using intelligent software agents. *European Journal of Operational Research*, v. 177, n. 3, p. 1985–2015. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.12.016
- Mauri, G. R., Oliveira, A. C. M., Lorena, L. A. N. (2010) Resolução do Problema de Alocação de Berços Através de Uma Técnica de Geração de Coluna. *Pesquisa Operacional*, v. 30, n. 3, p. 547–562. DOI: 10.1590/S0101-74382010000300003
- Meisel, F., Bierwirth, C. (2006) Integration of berth allocation and crane assignment to improve the resource utilization at a seaport container terminal. In: Haasis, H. D., Kopfer, H., Schonberger, J. (Eds.), *Operations Research Proceedings 2005*. Springer, Berlin., p. 105–110. DOI: 10.1007/3-540-32539-5_17
- Monaco, M. F., Sammarra, M. (2007) The berth allocation problem: a strong formulation solved by a Lagrangean approach. *Transportation Science*, v. 41, n. 2, p. 265–280. DOI: 10.1287/trsc.1060.0171
- O'Hare, G., Jennings, N. (1996) *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- Oguz, C., Błazewicz, J., Cheng, T. C. E., Machowiak, M. (2004) Berth allocation as a moldable task scheduling problem. In: Proceedings of the Ninth International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS 2004). Nancy, p. 201–205.
- Rashidi, H., Tsang, E. P. K. (2013) Novel constraints satisfaction models for optimization problems in container terminals. *Applied Mathematical Modelling* v. 37, n. 1, p. 3601–3634. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.042
- Rosa, R. (2006) Uma Abordagem Baseada em Negociação de Agentes para a Resolução do Problema de Alocação Dinâmica de Navios em Berços de Terminais Portuários. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Stahlbock, R., Voß, S. (2008) Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum*, v. 30, n. 1, p. 1–52. DOI: 10.1007/s00291-007-0100-9
- Steenken, D., Voß, S., Stahlbock, R. (2004) Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. *OR Spectrum*, v. 26, n. 1, p. 3–49. DOI: 10.1007/s00291-003-0157-z
- Sun, B., Sun, J. Q., Chen, Q. S. (2013). Integrated scheduling for berth and quay cranes based on robust and reactive policy. *Systems Engineering -Theory & Practice*, v. 33, n. 4, p. 1076–1083.
- Sun, B., Sun, J., Yang, P. (2009) The Design and Implementation of Berth Allocation Management System Based on MAS. In: Fifth International Conference on Natural Computation (ICNC 2009). IEEE, Tianjian, p. 593–597. DOI: 10.1109/ICNC.2009.533
- Theofanis, S., Boile, M., Golias, M. (2007a) An optimization based genetic algorithm heuristic for the berth allocation problem. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation 2007 (CEC 2007). IEEE Computer Society, Washington DC, p. 4439–4445. DOI: 10.1109/CEC.2007.4425052
- Theofanis, S., Golias, M., Boile, M. (2007b) Berth and quay crane scheduling: a formulation reflecting service deadlines and productivity agreements. In: Proceedings of the International Conference on Transport Science and Technology (TRANSTEC 2007) Czech Technical University, Prague, p. 124–140.
- Umang, N., Bierlaire, M., Vacca, I. (2011) The Berth Allocation Problem in Bulk Ports. In: Proceedings of the 11th Swiss Transport Research Conference (STRC 2011). Monte Verita/Ascona, Switzerland.
- Vis, I. F. A., de Koster, R. (2003) Transshipment of containers at a container terminal: an overview. *European Journal of*

Operational Research, v. 147, n. 1, p. 1–16. DOI:
10.1016/S0377-2217(02)00293-X

Wooldridge, M. (2000) Intelligent Agents, In: WEIS, G. (Org.), Multiagent Systems, A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. MIT Press, Cambridge.

Yan, N., Zhou, Y. (2013) Agent-Based Automatic Shore Operating Scheduling for a Container Terminal. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, v. 11, n. 2, p. 653–658. DOI: 10.11591/telkomnika.v11i2.1989

Yan, N., Liu, G., Xi, Z. (2008) A multi-agent system for container terminal management. In: 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2008). IEEE, Chongqing, p. 6247–6252. DOI: 10.1109/WCICA.2008.4593869

Yin, X. F., Khoo, L. P., Chen, C. H. (2011). A distributed agent system for port planning and scheduling. Advanced Engineering Informatics, v. 25, n. 3, p. 403–412. DOI: 10.1016/j.aei.2010.10.004

Yu, M., Wang, S. (2006) Study on Scheduling System Based on Multi-Agent of Container Terminal. 10th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 1–6. DOI: 10.1109/CSCWD.2006.253056

Zhao, H., Cheng, L. (2009) Coordinated Scheduling of Berth and Quay Crane Based on MAS. Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops (IITAW '09). IEEE, Nanchang, p. 328–331. DOI: 10.1109/IITAW.2009.121

Zhou, P., Kang, H., Lin, L. (2006) A dynamic berth allocation model based on stochastic consideration. In: Proceedings of the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2006). IEEE Computer Society, Washington DC, v. 2, p. 7297–7301. DOI: 10.1109/WCICA.2006.1714503