

Modelo integrado para seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo

Rafael Buback Teixeira¹ e Claudio Barbieri da Cunha²

Resumo: Este artigo trata do problema integrado de escolha de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo, visando maximizar a margem de contribuição líquida total. O problema é modelado como um problema de fluxo em rede multiproducto, possibilitando assim considerar restrições encontradas na prática, tais como diferentes tipos de contêineres, múltiplos navios e rotas e suas respectivas programações, múltiplas escala de um navio em um mesmo porto, capacidades dos navios em termos de número máximo de contêineres cheios e vazios por tipo, e peso máximo total, também e por trecho de rota entre dois portos, horizonte de planejamento longo. O modelo matemático proposto foi implementado em C++ e resolvido através do pacote de otimização GUROBI, a partir de dados armazenados em planilha eletrônica do tipo Excel. O mesmo foi aplicado a instâncias de testes compreendendo diferentes números de cargas. Os resultados evidenciam que o modelo permite resolver instâncias realísticas do problema de forma eficiente em tempos de processamento reduzidos.

Palavras-chave: transporte marítimo de contêineres, seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios, otimização.

Abstract: This paper deals with the integrated problem of selecting shipments and repositioning empty containers in the maritime transportation, aiming to maximize the total net contribution margin. The problem is modeled as a multi-commodity network flow problem, thus allowing us to take into consideration constraints found in practice such as different container types, several ships, routes and their respective schedules, routes that allow one port to be visited more than once, vessel capacities in terms of maximum number of loaded and empty containers by type and total maximum weight, for each vessel and also route stretch between two ports, long planning horizon, etc. The proposed mathematical model was implemented in C++ and solved by GUROBI optimization software, based on data stored in Excel spreadsheet. The model was applied to instances comprising different number of shipments. The results show that our model can effectively solve realistic instances to optimality in very short running times.

Keywords: maritime transport of containers, shipment selection and repositioning of empty containers, optimization.

1. INTRODUÇÃO

Desde os anos 60, quando teve início a popularização dos contêineres no transporte marítimo, o volume de cargas transportadas nesse equipamento aumentou a ponto de provocar uma mudança significativa no tráfego de mercadorias ao redor do mundo. A unitização das cargas proporcionada pelo uso de contêineres permite simplificar e agilizar os processos de manuseio, carga e descarga nos navios, além de facilitar a integração com outros modos de transporte terrestres complementares, tais como o ferroviário e o rodoviário. Além disso, a sua estrutura modular e unitizada possibilita a padronização e automação das operações envolvidas em sua movimentação e, conseqüentemente, proporciona um aumento da eficiência nos pontos de transferências e nos terminais e armazéns, reduzindo tempos e custos em toda cadeia logística.

O desenvolvimento da tecnologia de construção naval, com navios porta-contêineres cada vez maiores, chegando atualmente a capacidades da ordem de 13 mil TEUs (do inglês *Twenty-foot equivalent unit*, que significa unidade de 20 pés ou equivalente, correspondente a um contêiner de 20

pés de comprimento, por 8 pés de largura e altura), em conjunto com o aumento do comércio exterior entre nações, resulta no crescimento significativo do volume de cargas containerizadas. Nesse contexto, um gerenciamento adequado da movimentação de contêineres ao longo da cadeia, tanto de contêineres carregados quanto de vazios, torna-se essencial, uma vez que a maior competição entre as companhias de navegação exerce uma pressão sobre os custos das mesmas, o que, aliado ao desequilíbrio entre oferta e demanda de contêineres vazios em certos portos e regiões, e também à demanda superior à capacidade dos navios em algumas rotas, como é o caso das rotas de cabotagem e também daquelas que passam pelo Brasil e pela Costa Leste da América do Sul, levam à necessidade de um sistema de apoio à decisão eficiente que possibilite determinar a melhor seleção de cargas a serem transportadas, concomitantemente com o reposicionamento dos contêineres vazios; em muitos casos, uma carga aparentemente lucrativa pode acarretar a necessidade do retorno ou do reposicionamento dos contêineres vazios a partir do destino, pela ausência de outras cargas que pudessem utilizá-los, o que pode afetar outros fluxos de contêineres carregados, tendo em vista a menor capacidade dos navios, que carregam os contêineres vazios.

Nesse contexto, este artigo trata da modelagem matemática do problema integrado que combina decisões quanto ao transporte de contêineres cheios e vazios no transporte marítimo; mais especificamente o aceite ou rejeição de cargas e o reposicionamento de contêineres vazios. Tal problema é particularmente aplicável em cenários em que a demanda por transporte de contêineres supera a capacidade de transporte, normalmente em alguns trechos das rotas dos navios,

¹ Rafael Buback Teixeira, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: buback@usp.br).

² Claudio Barbieri da Cunha, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: cbcunha@usp.br).

Manuscrito recebido em 20/1/2012 e aprovado para publicação em 27/4/2012. Este artigo é parte de TRANSPORTES v. 20, n. 1, 2012. ISSN: 2237-1346 (online).

em um período específico ou de maneira sistêmica, como vem ocorrendo mais recentemente na cabotagem brasileira. Propõe-se então uma estratégia de solução na qual o problema é modelado como um problema de fluxo em rede multiproduto (“*multi-commodity network flow problem*”), com decisões e restrições adicionais de seleção de cargas a serem transportadas, em uma rede espaço-tempo (“*space-time network*”), onde cada tipo de contêiner representa um produto (“*commodity*”).

O modelo foi testado considerando instâncias baseadas em situações reais de seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios. Os resultados obtidos são comparados no que diz respeito ao comportamento do modelo frente às alterações nas demandas do transporte de cargas, o que possibilita evidenciar sua adequação para solucionar o problema considerado.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta um breve referencial teórico de trabalhos relacionados ao problema abordado; a seção 3 caracteriza o problema e detalha a modelagem do mesmo; a seção 4 descreve a aplicação do modelo proposto para diferentes cenários; finalmente, a seção 5 apresenta as conclusões do estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O trabalho de White (1972) é um dos pioneiros no tratamento do problema de movimentação de contêineres. O autor considerou apenas a movimentação de vazios, sendo o problema resolvido por meio de um modelo de fluxo em rede em que a alocação e a distribuição dos mesmos são tratadas como um problema de transbordo dinâmico. Esse problema, conforme Herer e Tzur (2003), pode ser visto como uma extensão do problema clássico de Wagner-Whitin (Wagner e Whitin, 1958), onde é considerada mais de uma fonte (fornecedor) para o reabastecimento do estoque de uma determinada localidade. Para White (1972), o objetivo é determinar a origem das unidades de contêineres vazios quando não há equipamentos suficientes para atender a demanda de um determinado local. Para isso, o autor buscou a otimização do fluxo de contêineres vazios através de uma função linear de custo.

Lai *et al.* (1995) propuseram um modelo baseado em técnicas de simulação para tratar de um problema de movimentação de contêineres vazios enfrentado por uma companhia de navegação. Cheung e Chen (1998), por sua vez, estudaram um modelo de fluxo em rede estocástico com dois estágios para o problema de alocação dinâmica de contêineres, empregando uma abordagem baseada em programação estocástica para a sua solução, com demanda por apenas um tipo de contêiner. A resolução do modelo foi dividida em dois estágios, sendo o primeiro determinístico e o segundo estocástico; e a solução obtida através de um método de linearização estocástico. Para o caso de problemas com múltiplos tipos de contêineres, os trabalhos de Crainic e Delorme (1995) e Gendron e Crainic (1993) descrevem algoritmos baseados no método *branch-and-bound* para a sua resolução.

Já Abrache (1999) propôs um novo método de decomposição primal para o problema da alocação de contêineres vazios que é modelado como um modelo determinístico, dinâmico e multi-produto que representa o problema.

Barco (1998) desenvolveu um modelo de programação

linear para determinação da configuração ótima de reposicionamento de contêineres vazios para todas as rotas da empresa de navegação de cabotagem, que considera os modos marítimo e terrestre, e a possibilidade de aluguel de contêineres vazios, quando necessário. O modelo proposto por Rezende (2003) pode ser visto como uma extensão do modelo de Barco (1998), uma vez que permite a dupla passagem de um mesmo navio em cada porto considerado, como ocorre nas rotas de cabotagem, que usualmente são circulares, sendo os portos visitados em ambos os sentidos de percurso (no sentido norte e no sentido sul no caso da costa leste da América do Sul). Esse modelo foi validado utilizando os mesmos dados obtidos no trabalho de Barco (1998), entretanto, não houve comparação posterior dos resultados dos dois trabalhos.

Souza (2001) apresenta uma descrição detalhada dos procedimentos operacionais de alocação de contêineres em relação às demandas e ao fluxo de informações de uma companhia de navegação. É feita uma análise comparativa entre resultados apresentados por três modelos de otimização propostos pelo autor: um heurístico, seguindo as mesmas considerações do procedimento-padrão da empresa de navegação; um modelo guloso, que aloca a maior quantidade de contêineres possível nos arcos de menores custos; e um modelo de alocação utilizando o algoritmo Out-of-Kilter. A comparação dos resultados indicada que o modelo guloso de alocação de contêineres vazios obteve o custo mínimo. O autor observa que é um modelo a ser refinado, já que enxerga somente períodos subsequentes, ao invés do horizonte como um todo.

Costa (2006) propôs um modelo de programação linear que visa à maximização da margem de contribuição dentro de um horizonte de planejamento pré-determinado, auxiliando no planejamento tático da empresa de navegação. A opção de utilizar a margem de contribuição em detrimento de lucro deveu-se à dificuldade de obter os reais custos fixos relacionados às operações de transporte. Seu trabalho tem enfoque em uma única rota, da empresa Hamburg Süd, entre o Brasil e a Europa, considerando a discretização do tempo em meses. O autor ressalta, ainda, a importância da logística de contêineres vazios no planejamento da companhia de navegação.

Em um estudo de caso considerando quatro armadores, Nobre (2006) obteve resultados qualitativos que verificam a importância da gestão logística na reformulação de estratégias de geração de receitas e minimização de custos. O autor considera que as receitas atreladas ao transporte de cargas dependem também da produtividade dos contêineres, os quais devem ser utilizados em ciclos (alternando entre cheios e vazios), o maior número de vezes possível. Em outras palavras, os ciclos de utilização de um contêiner só podem ser concluídos efetivamente se este estiver vazio e disponível para o transporte de uma determinada carga. Sendo assim, o autor conclui que o contêiner é um ativo básico e estratégico, uma vez que somente há transporte de carga e, conseqüentemente, receita gerada, se houver prioritariamente contêineres vazios no local em que a carga está relacionada.

Cuoco (2008) tratou do problema integrado de movimentação de contêineres cheios e vazios, o qual foi solucionado através de uma heurística gulosa, em que as cargas são selecionadas segundo uma ordenação que considera diferentes critérios de rentabilidade. O objetivo é a otimização da se-

leção de clientes, considerando que, para cada cliente, existe uma carga a ser transportada. A heurística proposta possibilita verificar, de maneira simplificada, a possibilidade de reposicionamento de contêineres vazios no caso de não haver disponibilidade dos mesmos nos portos de origem das cargas candidatas a serem transportadas. Já o trabalho de Maranhão (2009) também trata da alocação de contêineres cheios e vazios dinamicamente integrados. A heurística proposta pelo autor é inspirada no problema de programação de máquinas do tipo “*job-shop*”, em uma situação onde a quantidade de máquinas é igual ao número de tarefas.

Zambuzi (2010) formulou um modelo de planejamento da distribuição de contêineres vazios, cujo objetivo é minimizar os custos envolvendo a movimentação dos mesmos, buscando o balanceamento entre ofertas e demandas nos portos considerados. Para tanto, foi desenvolvido um modelo de fluxo em rede multi-produto, em uma rede espaço-tempo, considerando as restrições de capacidade de transporte dos modos envolvidos. Nessa rede, as rotas dos navios são conhecidas, assim como não há limitação quanto ao número de passagens de um navio por um mesmo porto, dentro do horizonte de planejamento. Adicionalmente, o reposicionamento de contêineres vazios pode ser realizado tanto através do modo marítimo quanto do terrestre (rodoviário ou ferroviário); adicionalmente, existe a possibilidade de aluguel de contêineres vazios para suprir necessidades pontuais de oferta nos portos.

Considerando-se especialmente o problema tratado por Cuoco (2008) e o modelo proposto por Zambuzi (2010), observou-se uma oportunidade de se propor um modelo de otimização, baseado em uma rede espaço-tempo, para o problema que integra as decisões de seleção de cargas com as de movimentação de contêineres vazios. O potencial dessa abordagem deve-se ainda ao fato de que não foram encontrados na literatura trabalhos que abordem o problema citado, através da utilização de modelos baseados em fluxo em rede. Existem muitos trabalhos na literatura que tratam da movimentação de contêineres; no entanto, a maioria trata do problema de contêineres vazios, enquanto que uma menor parte trata do problema integrado de movimentação de contêineres cheios e vazios, porém geralmente sem considerar uma restrição prática usual nesse mercado, que é a de não considerar o transporte parcial dos contêineres que compõem uma solicitação de um cliente; em outras palavras, alguns clientes preferem procurar uma outra empresa de navegação ao invés de dividir a sua carga entre dois armadores.

3. CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Os contêineres são normalmente de propriedade das empresas de navegação, sendo que aos clientes dessas companhias cabe apenas requisitar contêineres vazios para o transporte de seus produtos dentro desses equipamentos. Há, no entanto, algumas situações especiais em que os contêineres não são propriedades das companhias de navegação, especialmente contêineres de um tipo especial, ou de empresas com fluxo balanceado entre dois portos; nesse caso, cabe à companhia de navegação somente o transporte dos contêineres do embarcador.

Define-se, para cada solicitação de transporte de cargas por um embarcador, se é permitido o aceite parcial, onde

somente parte de uma carga poderá ser transportada (geralmente em virtude de restrições de capacidade no atendimento); caso contrário, quando há impossibilidade no atendimento de determinada solicitação, mesmo que parcialmente, a solicitação de transporte não poderá ser atendida, ou seja, deverá ser totalmente rejeitada. Além desses casos, pode haver eventuais solicitações que devem ser obrigatoriamente atendidas, uma vez que a decisão de aceitação pode ter sido tomada anteriormente e, conseqüentemente, não pode ser revertida, ou então trata-se de um contrato de longo prazo, com embarques regulares. Mesmo nesses casos em que não há decisão de aceitação de cargas é importante a consideração desses fluxos no modelo matemático, ao invés de simplesmente deduzidos da capacidade disponível do navio, uma vez que os mesmos geram contêineres vazios nos respectivos portos de destino das cargas que podem necessitar serem reposicionados.

A rentabilidade das solicitações é um dos fatores determinantes frente à necessidade de rejeição, quando pode haver insuficiência de capacidade para o transporte, como vem ocorrendo na cabotagem na costa leste da América do Sul, em que os navios que atendem essas rotas ainda pequenos e antigos. Normalmente, define-se a rentabilidade de cada solicitação com base na margem de contribuição, uma vez que, segundo aponta Costa (2006), há dificuldade de obter os reais custos fixos relacionados às operações do transporte marítimo de contêineres, além da dificuldade de rateio desses custos entre as diferentes cargas. Ainda segundo o autor, a margem de contribuição pode ser definida como a receita da venda de um produto ou serviço menos os custos variáveis, ou seja, o valor resultante disponível para pagar os custos fixos e contribuir para o lucro, após os custos variáveis terem sido pagos.

Assim, cada solicitação de transporte de contêineres tem sua margem de contribuição conhecida, e determinada com base no tipo de carga e de contêiner, nos custos de embarque e desembarque nos portos de origem e de destino, e no navio que deverá realizar o transporte. Em caso de aceite parcial de determinada solicitação, a margem de contribuição será proporcional à quantidade de contêineres a serem aceitos.

No modelo proposto neste trabalho, cada requisição de um cliente será tratada individualmente, sendo que para cada uma delas, denominada genericamente de “carga”, são conhecidos: i) a data e porto de embarque; ii) o navio que realizará o seu transporte, assim como o trecho de rota percorrido pela carga, em termos do porto de destino e a data da chegada; iii) a composição das cargas em termos dos tipos e quantidades de contêineres a serem transportados (normalmente apenas um tipo ou tamanho de contêiner, mas o modelo é genérico de forma a permitir considerar uma solicitação composta de contêineres de mais de um tipo ou tamanho); iv) o peso bruto individual de cada contêiner e o peso bruto total da carga, incluindo a tara dos contêineres; v) a propriedade dos contêineres (próprios ou de terceiros); vi) a condição de aceite da carga, parcial ou total; e vii) a margem de contribuição de cada contêiner e a total, caso a carga seja aceita para o transporte.

Toda “carga” definida no modelo, exceto aquelas de transporte obrigatório, está sujeita ao aceite ou a rejeição por parte da companhia de navegação, em virtude da incapacidade parcial de atendimento da demanda na data solicitada pelo cliente, seja por motivo de capacidade, seja por

indisponibilidade de contêineres vazios. Cada uma das cargas é tratada individualmente, mesmo que existam duas ou mais cargas, em rotas e datas diferentes, mas que pertençam a um mesmo embarcador. Em caso de indisponibilidade de contêineres vazios para o atendimento de alguma carga, o modelo verifica a possibilidade de reposicionamento de contêineres vazios eventualmente disponíveis em outros portos com a antecedência necessária para possibilitar o carregamento pelo cliente e o transporte até o porto; caso não haja contêineres vazios disponíveis para o seu transporte, a carga não poderá ser aceita. Dessa forma, considera-se, de maneira integrada à seleção de cargas, a eventual necessidade de reposicionamento de contêineres vazios, decorrente de desequilíbrios que ocorrem devido ao fato de que alguns portos são predominantemente de exportação e outros, de importação.

Para a modelagem considera-se todas as atividades envolvidas nos ciclos de movimentação dos contêineres cheios e dos vazios. No transporte de contêineres cheios, consideram-se as seguintes atividades: i) tempo livre para o cliente acondicionar a carga nos contêineres a ele designados e o transporte até o porto de origem; ii) embarque; iii) transporte marítimo; iv) desembarque e; v) tempo livre após o desembarque para transporte até o destino e descarga. Já no caso do reposicionamento de contêineres vazios, as seguintes atividades são consideradas: i) embarque; ii) transporte marítimo e; iii) desembarque. Considera-se ainda que, enquanto os contêineres estão vazios e disponíveis, os mesmos permanecem em estoque. A Figura 1 ilustra a integração entre os ciclos dos contêineres cheios e vazios.

Com base nos ciclos dos contêineres cheios e vazios, e nas restrições de capacidade de transporte dos navios para diferentes tipos de contêineres, bem como nas disponibilidades de contêineres vazios nos portos ao longo do tempo, o modelo proposto objetiva responder às seguintes questões principais:

- Quais são as cargas a serem transportadas?
- Quantos contêineres vazios devem ser reposicionados, quando e como; ou seja, qual a origem e o destino dos contêineres vazios a serem transportados, e em qual navio estes devem ser alocados para o transporte?

O objetivo a ser alcançado é a maximização da margem de contribuição líquida total no horizonte em análise, determinada pela diferença entre a margem de contribuição bruta total (que é obtida em função das cargas aceitas) e os custos de reposicionamento dos contêineres vazios, consi-

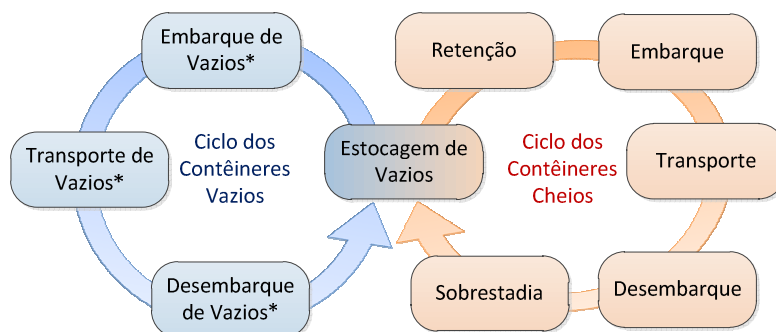
derando restrições de capacidade da frota e de disponibilidade de contêineres para o transporte. Assume-se ainda ser fixa a frota de contêineres, ou seja, o modelo não permite avaliar a opção de aluguel como alternativa de atendimento a um cliente por falta de contêineres.

Para a modelagem do problema propõe-se um modelo de fluxo em rede multiproduto (“*multi-commodity network flow model*”) em uma rede espaço-tempo (“*space-time network*”), considerando-se, ainda, as seguintes premissas adicionais:

- a. admite-se o reposicionamento de contêineres vazios somente através do modo de transporte marítimo, cujas rotas dos navios são conhecidas e pré-determinadas;
- b. não há restrição quanto ao número de passagens de um navio em um mesmo porto ao longo do horizonte de planejamento analisado;
- c. o carregamento e descarregamento de contêineres vazios em um dado porto consideram somente as operações de embarque e desembarque de contêineres dos navios, para, respectivamente, o transporte marítimo dos contêineres e o atendimento da demanda no porto;
- d. para cada carga sabe-se se é possível o aceite parcial ou apenas o aceite total dos contêineres cheios a serem transportados; e
- e. não há possibilidade de troca ou substituição do tipo de contêiner requisitado pelo cliente.

São consideradas no modelo capacidades e custos referentes às diversas atividades que envolvem os contêineres, conforme mostrado na Figura 1, conforme abaixo:

1. Nas atividades de transporte de contêineres cheios e de reposicionamento de contêineres vazios, considera-se que os navios possuem capacidades específicas, em peso, número de TEUs e unidades por tipo de contêiner. Tais limitações podem variar por trecho da rota do navio, dependendo das restrições específicas impostas no planejamento;
2. Nas atividades de embarque e desembarque de contêineres nos navios, tanto para contêineres cheios quanto vazios, respeitam-se eventuais capacidades na movimentação de contêineres, tendo em vista eventual restrição de duração de janela para atracação que pode limitar o número de unidades movimentadas; e
3. Existe uma relação direta entre o navio e cada porto/terminal marítimo no que diz respeito ao calado.



(*) Reposicionamento de contêineres, que engloba as atividades de embarque, transporte e desembarque de vazios.

Figura 1. Ciclo dos contêineres vazios e cheios

Assim, na modelagem proposta são levadas em consideração as restrições de peso do navio, seja pela sua capacidade própria ou, eventualmente, pelo chamado máximo permitido em determinado porto em sua rota conhecida, restringindo o peso total máximo do navio para o embarque e desembarque.

No caso dos contêineres vazios, sua movimentação ocasiona custos relativos ao manuseio, estoque, embarque, desembarque, transporte marítimo, dentre outros custos. No caso do modelo proposto, consideram-se custos fixos por unidade de contêiner, relativos às operações (atividades) de embarque e desembarque, específicos para cada um dos portos, e de transporte, específicos para cada um dos navios. Definem-se estes custos fixos com base nas análises já conhecidas pelo tomador de decisão. Para cada unidade de contêiner embarcada ou desembarcada em determinado porto, ou transportada em determinado navio, considera-se um custo por tipo de contêiner.

3.1. Representação da rede

Seja $G=(N,A)$ a rede espaço-tempo, onde N e A indicam, respectivamente, os conjuntos dos nós e dos arcos. Definem-se ainda os seguintes conjuntos: $P = (1, 2, \dots, p, \dots, |P|)$, o conjunto de portos; $T = (1, 2, \dots, t, \dots, |T|)$ o conjunto dos períodos de tempo do horizonte de planejamento, normalmente medidos em dias, mas que podem assumir qualquer duração, sem perda de generalidade; $E = (1, 2, \dots, e, \dots, |E|)$ o conjunto de embarcações (navios) da rede de serviços; $K = (1, 2, \dots, k, \dots, |K|)$ o conjunto dos diferentes tipos de contêineres; e $R = (1, 2, \dots, r, \dots, |R|)$ o conjunto de cargas a serem transportadas.

Para cada carga $r \in R$ são conhecidos o peso total w_r^k e o número (quantidade) q_r^k de contêineres de cada tipo $k \in K$ que a compõem; deve-se notar que essa forma de representação permite que uma carga seja composta por contêineres de mais de um tipo ou tamanho k , embora usualmente cada requisição corresponda a contêineres de apenas um tipo. Adicionalmente, é conhecida a margem de contribuição bruta total m_r a ser gerada pelo aceite da carga r .

Cada tipo de contêiner $k \in K$ possui atributos específicos, que independem da carga sendo transportada: α^k que indica a equivalência de cada tipo de contêiner em TEUs (por exemplo, um contêiner de 20 pés de comprimento equivale a

um TEU, enquanto que um contêiner de 40 pés de comprimento equivale a dois TEUs); β^k que indica a tara (peso nominal vazio) do contêiner do tipo k .

Para fins de modelagem, o conjunto R das cargas candidatas a serem transportadas é subdividido em dois subconjuntos distintos, de acordo com a propriedade (posse) dos contêineres: $R^E = (1, 2, \dots, r, \dots, |R^E|)$ que compreende todas as cargas cujos contêineres são de propriedade do embarcador e $R^C = (1, 2, \dots, r, \dots, |R^C|)$ de todas as cargas cujos contêineres são de propriedade da companhia de navegação; naturalmente $R^E \cup R^C = R$.

Adicionalmente definem-se $R^T = (1, 2, \dots, r, \dots, |R^T|)$, que compreende todas as cargas que somente admitem aceite ou rejeição total dos contêineres; $R^P = (1, 2, \dots, r, \dots, |R^P|)$ das cargas que permitem o aceite parcial dos contêineres; e $R^O = (1, 2, \dots, r, \dots, |R^O|)$ das cargas já aceitas, não cabendo sua rejeição parcial ou total. Analogamente, $R^T \cup R^P \cup R^O = R$.

O grafo G , ilustrado na Figura 2, é acíclico, direcionado, iniciando no nó “s” e terminando no nó “t”. Os nós que compõem a rede espaço-tempo são classificados da seguinte maneira:

1. Nós marítimos ($NMT \subset N$) representando cada um dos portos $p \in P$ em cada um dos períodos de tempo $t \in T$ em que o horizonte de planejamento é discretizado; os mesmos são representados por círculos azuis na Figura 2.
2. Nós de estoque ($NIV \subset N$), que representam um porto $p \in P$ em cada um dos períodos de tempo $t \in T$ do horizonte de planejamento (círculos brancos).
3. Nós de fonte local ($NSL \subset N$), que representam a oferta (ou disponibilidade) inicial de contêineres vazios nos portos $p \in P$ no início do horizonte de planejamento (círculos verdes s_1 a s_5 na Figura 2).
4. Nós de sorvedouro local ($NTL \subset N$), que indicam os contêineres em cada um dos portos $p \in P$ no final do horizonte de planejamento (círculos de cor laranja t_1 a t_5).
5. Nó de fonte global ($NSG \subset N$), que representa toda oferta inicial de contêineres. No exemplo da Figura 2 (hexágono verde e letra “s”).
6. Nó de sorvedouro global ($NTG \subset N$), que representa todo o fluxo final de contêineres da rede (hexágono laranja e a letra “t”).

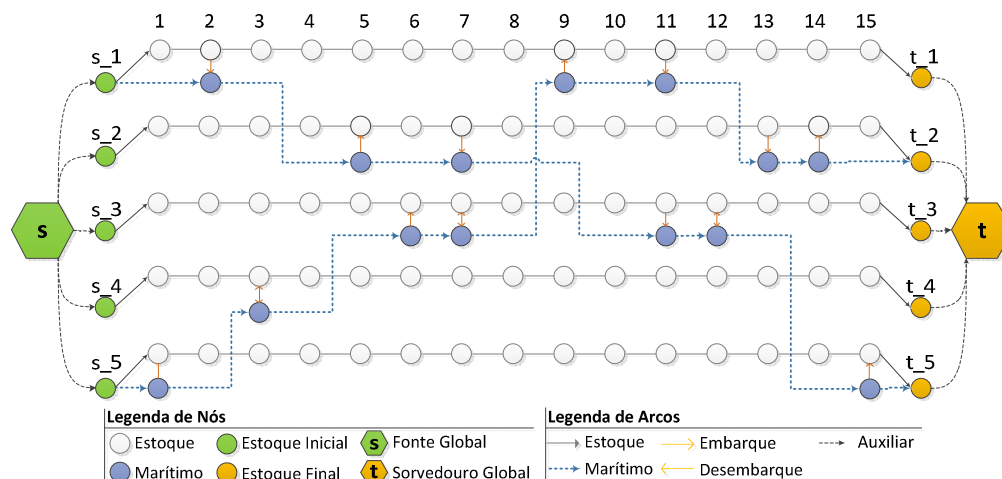


Figura 2. Exemplo de representação de uma rede espaço-tempo

Para cada nó da rede $i \in N$ são definidos os seguintes atributos:

- $p \in P$: local (porto) na rede espaço-tempo. Para o nó de fonte global, ou seja, $i \in NSG$, o atributo é nulo, ou seja, não representa nenhum porto em particular;
- $t \in T$: período dentro do horizonte de planejamento. Este atributo é aplicável somente ao nó $i \in (NMT \cup NIV)$. Para os demais nós, o atributo não é aplicável;
- $e \in E$ navio da rede. Aplicado somente aos nós $i \in NMT$. Para os demais nós, o atributo não é aplicável;
- d_i^k : saldo de contêineres do tipo $k \in K$ no nó $i \in N$.

Os arcos que interligam os nós da rede espaço-tempo são classificados como segue:

- Arcos marítimos ($AM \subset A$), cujos fluxos representam tanto o transporte de contêineres cheios, para as cargas aceitas, quanto de contêineres vazios sendo reposicionados, nas rotas de navios pré-definidas. Um arco marítimo $(i,j) \in AM$ interliga dois portos consecutivos de rota de um navio entre dois instantes de tempo t_1 e t_2 , com $t_1 < t_2$. Adicionalmente, pode representar a permanência da embarcação em um dado porto por um determinado período, nos casos em que os nós de origem e destino são de um mesmo porto, por períodos de tempo consecutivos. A Figura 3 ilustra um exemplo de desse tipo de arco;
- Arcos de estoque ($AI \subset A$), que representam a permanência de contêineres, em um mesmo porto, em terra, fora dos navios, entre períodos de tempo subsequentes; isso inclui as atividades de tempos livres antes do embarque e após o desembarque de contêineres cheios das cargas selecionadas, além de atividades de estocagem de contêineres vazios. Para os portos p_1 e p_2 e os períodos t_1 e t_2 , atributos dos nós i e j , respectivamente, tem-se que $p_1 = p_2$ e $t_2 = t_1 + 1$. Interligam-se os nós de estoque somente quando representados por um mesmo porto, mas em períodos subsequentes. Um exemplo de representação gráfica para este tipo de arco pode ser visto na Figura 4;
- Arcos de embarque ($AE \subset A$), que indicam o embarque tanto de contêineres cheios, das cargas selecionadas, quanto de contêineres vazios sendo reposicionados a partir de um porto de origem. As capacidades desses arcos correspondem às capacidades do porto relacionado; ou seja, um arco de embarque $(i,j) \in AE$, interliga um porto a uma embarcação em um mesmo instante de tempo do horizonte de planejamento. Para os portos p_1 e p_2 e os períodos t_1 e t_2 , atributos dos nós i e j , respectivamente, temos que $p_1 = p_2$ e $t_1 = t_2$. A Figura 5 permite observar um exemplo de representação deste tipo de arco;
- Arcos de desembarque ($AD \subset A$), que representam o desembarque tanto de contêineres cheios, das cargas selecionadas quanto de contêineres vazios sendo reposicionados, a partir de uma embarcação em um porto de destino onde a embarcação encontra-se atracada; ou seja, um arco de desembarque $(i,j) \in AD$, interliga uma embarcação a um porto em um mesmo instante de tempo do horizonte de planejamento. Pa-

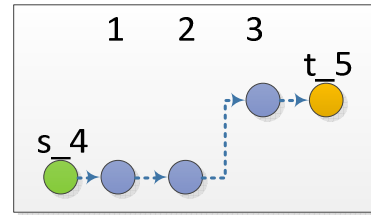


Figura 3. Representação dos arcos AM

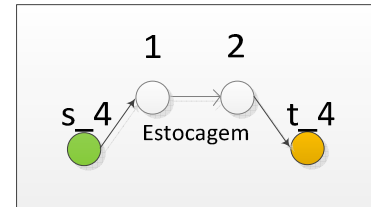


Figura 4. Representação dos arcos AI

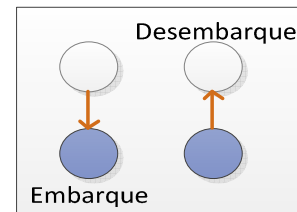


Figura 5. Representação dos arcos AE e AD associados aos nós MNT e NIV

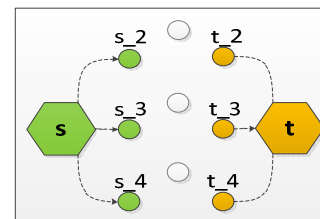


Figura 6. Representação dos arcos AX associados aos nós NSL, NTL, NSG e NTG

ra os portos p_1 e p_2 , e os períodos t_1 e t_2 , atributos dos nós i e j , respectivamente, temos que $p_1 = p_2$ e $t_1 = t_2$. A Figura 5 permite observar um exemplo de representação deste tipo de arco; e

- Arcos Auxiliares ($AX \subset A$), onde $(i,j) \in AX$, que interligam os nós i e $j \in N$, onde $i \in NSG$ e $j \in NSL$ ou $i \in NTL$ e $j \in NTG$. Dessa maneira, distribuem-se os contêineres disponíveis da fonte global (NSG) para os nós de fonte local (NSL) em cada um dos portos. De modo semelhante, os contêineres transferidos pelo fluxo dos arcos da rede para um período final do horizonte de planejamento são recebidos pelos sorvedouros locais de cada um dos portos (NTL) e concentrados no sorvedouro global (NTG), visando atendimento da demanda global da rede. A Figura 6 ilustra a representação desses arcos.

Finalmente, para cada um dos arcos $(i,j) \in A$ definem-se os seguintes atributos, de acordo com o tipo de arco:

1. Para todos os arcos do conjunto A :
 - Nó de origem $i \in N$ e nó de destino $j \in N$;
 - S_{ij} : Subconjunto de cargas;
2. Para os arcos marítimos ($AM \subset A$):
 - u_{ij}^k : Capacidade do arco $(i,j) \in AM$, em unidades de contêineres do tipo $k \in K$;

- U_{ij} : Capacidade global do arco $(i,j) \in AM$, em TEUs;
 - z_{ij}^k : Capacidade do arco $(i,j) \in AM$, em unidades de contêineres vazios do tipo $k \in K$;
 - Z_{ij} : Capacidade global de contêineres vazios do arco $(i,j) \in AM$, em TEUs;
 - Ω_{ij} : Capacidade global do arco $(i,j) \in AM$, em unidade de peso;
 - l_{ij}^k : Limite inferior para o arco $(i,j) \in AM$, em unidades de contêineres vazios do tipo $k \in K$;
 - C_{ij}^k : Custo unitário de fluxo de contêineres vazios do tipo $k \in K$ no arco $(i,j) \in AM$;
3. Arcos de estoque ($AI \subset A$):
- l_{ij}^k : Limite inferior para o arco $(i,j) \in AI$, em unidades de contêineres do tipo $k \in K$. Normalmente aplicado aos arcos de estoque com origem em nó *NSL* (fonte local), para representar estoque de contêineres vazios nos terminais.
4. Arcos de embarque ($AE \subset A$) e de desembarque ($AD \subset A$):
- z_{ij}^k : Capacidade do arco $(i,j) \in (AE \cup AD)$, em unidades de contêineres, para cada tipo de contêiner $k \in K$, quando vazio;
 - Z_{ij} : Capacidade global do arco $(i,j) \in (AE \cup AD)$, em TEUs, para todos tipos de contêineres, quando vazios;
 - Ω_{ij} : Capacidade global do arco $(i,j) \in (AE \cup AD)$, em unidade de peso, para o navio $e \in E$ quanto ao calado no porto $p \in P$.
 - C_{ij}^k : Custo unitário de fluxo de contêineres vazios do tipo $k \in K$ no arco $(i,j) \in (AE \cup AD)$. Considera-se o custo do contêiner vazio durante o embarque, de um porto e período de origem;
5. Arcos Auxiliares ($AX \subset A$):
- l_{ij}^k : Limite inferior para o arco $(i,j) \in A$, em unidades de contêineres, representando o limite inferior para o estoque inicial de contêineres.

Define-se ainda, para cada carga $r \in R$, $a_{ij}^r = 1$ se a carga $r \in R$ utiliza o arco $(i,j) \in A$ no seu transporte; $a_{ij}^r = 0$ caso contrário. Dessa forma, define-se o conjunto $S_{ij} = \{r \in R : a_{ij}^r = 1\}$ de todas as cargas $r \in R$ que utilizam o arco $(i,j) \in A$.

3.2. Formulação matemática

Inicialmente, definem-se as seguintes variáveis de decisão para o modelo matemático proposto.

Seleção de carga:

- $Y_r = 1$, se a carga $r \in (R^T \cup R^O)$ é aceita; 0, caso contrário e $r \in R^P$;
- F_r : Fração aceita da carga $r \in R^P$;
- Q_r^k : Quantidade de contêineres do tipo $k \in K$ e car-

ga $r \in R$ aceita para o transporte;

Fluxo de cheios:

- X_{ij}^k : Fluxo de contêineres cheios, de responsabilidade da companhia de navegação, do tipo $k \in K$, no arco $(i,j) \in A$;
- X_{ij}^k : Fluxo de contêineres cheios, de responsabilidade do embarcador, do tipo $k \in K$, no arco $(i,j) \in A$;

Fluxo de vazios:

- V_{ij}^k : Fluxo de contêineres vazios do tipo $k \in K$, no arco $(i,j) \in A$.

A formulação matemática do problema integrado de seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios é dada por:

Maximizar

$$\sum_{r \in R^T} m_r Y_r + \sum_{r \in R^P} m_r F_r - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in (AM \cup AE \cup AD)} C_{ij}^k V_{ij}^k \quad (1)$$

Sujeito a

$$Q_r^k = q_r^k Y_r \quad \forall r \in R^T \cup R^O, \forall k \in K \quad (2)$$

$$Q_r^k = q_r^k F_r \quad \forall r \in R^P, \forall k \in K \quad (3)$$

$$X_{ij}^k = \sum_{r \in R^C} a_{ij}^r Q_r^k \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (4)$$

$$X_{ij}^k = \sum_{r \in R^E} a_{ij}^r Q_r^k \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (5)$$

$$X_{ij}^k + X_{ij}^k + V_{ij}^k \leq u_{ij}^k \quad \forall (i,j) \in AM, \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \alpha^k (X_{ij}^k + X_{ij}^k + V_{ij}^k) \leq U_{ij} \quad \forall (i,j) \in AM \quad (7)$$

$$V_{ij}^k \leq z_{ij}^k \quad \forall (i,j) \in (AM \cup AE \cup AD), \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \alpha^k V_{ij}^k \leq Z_{ij} \quad \forall (i,j) \in (AM \cup AE \cup AD) \quad (9)$$

$$\sum_{r \in S_{ij}} \sum_{k \in K} \omega_r^k Q_r^k + \sum_{k \in K} \beta^k V_{ij}^k \leq \Omega_{ij} \quad (10)$$

$$\forall (i,j) \in (AM \cup AE \cup AD)$$

$$V_{ij}^k \geq l_{ij}^k \quad \forall (i,j) \in (AM \cup AE \cup AD), \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^k + V_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} X_{ji}^k + V_{ji}^k = d_i^k \quad (12)$$

$$\forall i \in N, \forall k \in K$$

$$Y_r = 1 \quad \forall r \in R^O \quad (13)$$

$$Y_r \in \{0,1\} \quad \forall r \in R^T \quad (14)$$

$$0 \leq F_r \leq 1 \quad \forall r \in R^P \quad (15)$$

$$Q_r^k \in Z^+ \quad \forall r \in R^T, \forall k \in K \quad (16)$$

$$X_{ij}^k \geq 0, X_{ij}^{tk} \geq 0, V_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (17)$$

A função objetivo (3.1) busca a maximização da margem de contribuição líquida total, que é obtida pela diferença entre a margem de contribuição bruta total, para aceite total (Y_r) e parcial (F_r) das cargas, e os custos de movimentação de contêineres vazios, que são calculados com base nos custos dos arcos (C_{ij}^k) para cada fluxo desses equipamentos (V_{ij}^k) nos arcos marítimos, de embarque e de desembarque, por tipo de contêiner $k \in K$.

As restrições (3.2) e (3.3) definem a quantidade inteira de contêineres (Q_r^k) aceita para cada carga r e tipo de contêiner k , de acordo com a opção de seleção total ou parcial de contêineres, respectivamente.

As restrições (3.4) garantem que, para cada quantidade de contêineres de uma determinada carga r aceita para o transporte (Q_r^k), cujos contêineres são de responsabilidade da companhia de navegação, exista um fluxo de contêineres cheios associado, para os arcos $(i, j) \in A$, aos quais os fluxos dessas cargas deverá seguir, e que é dado pelo conjunto S_{ij} das cargas que utilizam cada arco $(i, j) \in A$. Da maneira análoga, as restrições (3.5) garantem que, para cada quantidade de contêineres de uma determinada carga r aceita para o transporte (Q_r^k), cujos contêineres são de responsabilidade do embarcador, exista um fluxo de contêineres cheios associado.

As restrições (3.6) limitam o fluxo de contêineres, cheios ou vazios, no transporte marítimo, para os arcos $(i, j) \in AM$, por tipo de contêiner $k \in K$, à capacidade imposta (u_{ij}^k), em unidades de contêineres. Analogamente, as restrições (3.7) restringem a capacidade global (U_{ij}), em TEUs, em cada arco $(i, j) \in AM$.

O fluxo máximo de contêineres vazios em cada arco marítimo, de embarque e de desembarque $(i, j) \in (AM \cup AI \cup AX)$, em unidades para cada tipo de contêineres $k \in K$, é garantido pelas restrições (3.8). De maneira similar, as restrições (3.9) restringem o fluxo máximo total de contêineres vazios, considerando-se todos os tipos de contêineres.

O peso máximo (Ω_{ij}) admissível em cada arco $(i, j) \in (AM \cup AI \cup AX)$ é assegurado pelas restrições (3.10). Já as restrições (3.10) impõem um fluxo mínimo de contêineres vazios (l_{ij}^k) em unidades de contêineres, para cada tipo $k \in K$, no arco $(i, j) \in (AM \cup AI \cup AX)$; em geral $l_{ij}^k = 0$. As restrições (3.11) garantem o equilíbrio de fluxos em cada um dos nós da rede, através do balanceamento dos seus fluxos de entrada e de saída. Por fim, as restrições (3.12) a

(3.17) definem os domínios das variáveis de decisão.

Para uma idéia do número de variáveis envolvidas na resolução do modelo matemático proposto, considere-se, por exemplo, um problema real de cabotagem com dez portos e um horizonte de planejamento de quatro semanas, ou 28 dias, se o horizonte de tempo for discretizado em dias. Considerando cinco navios que atendem sete portos, resultam 485 arcos sendo 35 arcos do tipo *AM*, 270 do tipo *AI*, 70 do tipo *AE*, 70 do tipo *AD* e 40 do tipo *AX*.

Considerem-se ainda 50 cargas a serem transportadas, sendo 10 cargas com aceite parcial e 04 tipos de contêineres associados a cada carga. Nesse caso, o modelo matemático resultante possui 3880 variáveis positivas, referentes ao fluxo de contêineres, 200 variáveis inteiras referentes à quantidade aceita de contêineres, 40 variáveis binárias referentes à seleção de cargas que só permitem aceite ou rejeição total, e 10 variáveis, que definem percentualmente a quantidade de contêineres cheios aceitos, considerando todos os contêineres da companhia de navegação.

4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

O modelo foi implementado utilizando o pacote de otimização GUROBI 4.0, com codificação em linguagem C++. A interface para entrada de dados foi desenvolvida em ambiente de planilha eletrônica do tipo Excel. Todos os experimentos computacionais foram realizados em um computador com processador de 2.4GHz e 1GB de memória RAM. Os dados utilizados nos problemas analisados podem ser obtidos diretamente com os autores.

4.1. Verificação do modelo

Alguns cenários reduzidos, envolvendo a rede espaço-tempo simplificada apresentada na Figura 1, foram testados com o objetivo de verificar a correção do modelo matemático proposto, tanto em termos dos seus componentes (função objetivo e restrições) como também da interface de entrada de dados e interpretação dos resultados. Esses cenários permitiram a comparação e verificação das soluções obtidas computacionalmente com soluções determinadas manualmente.

4.2. Análise comparativa com os resultados de Cuoco (2008)

O modelo proposto neste trabalho é mais genérico que o da heurística gulosa proposta por Cuoco (2008), em que as cargas são selecionadas segundo uma ordenação que considera diferentes critérios de rentabilidade, para o problema integrado de movimentação de contêineres cheios e vazios. Dessa maneira, foram consideradas as seguintes simplificações no modelo, a fim de permitir a comparação de resultados: único tipo de contêiner; sem capacidade específica por trecho de rota de navio; não é permitido aceite parcial de carga; não se consideram os estados iniciais de carregamento dos navios; permanência do navio de apenas um dia em cada porto, ou seja o navio atraca e desatraca em um mesmo período (ou dia), ocorrendo nesse período todo o processo de embarque e de desembarque de contêineres cheios e vazios.

Os dados considerados se baseiam em dados reais de uma empresa de navegação de cabotagem na costa brasileira. Mais especificamente, considera-se uma rota, com 3 navios (FRO, FMC e FMN), que atendem 10 portos (FOR, SUA,

MCZ, SSA, VIX, RIO, SSZ, SFS, RIG e BUE). Todas as rotas dos navios, conforme definidas no trabalho de Cuoco (2008), são cíclicas, com duração do ciclo de 9 a 58 dias, dependendo do navio, para serviços de cabotagem internacional na Costa da América do Sul. O horizonte de planejamento considerado é de 62 dias. Para cada navio são definidas as respectivas capacidades de contêineres e de peso bruto total: o navio FRO transporta até 1.254 TEUs, com peso bruto total de 13.800 toneladas; já os navios FMC e FMN carregam até 666 TEUs e peso bruto total de 8.200 toneladas.

Definiu-se um estoque inicial (no início do período de planejamento) de 50 contêineres vazios em cada um dos dez portos, totalizando 500 unidades. As solicitações de cargas a serem transportadas foram geradas aleatoriamente, considerando todas as possíveis combinações de origens e de destinos dentre os dez portos atendidos pelos navios da rota.

A Tabela 1 apresenta a comparação dos resultados entre o modelo proposto neste trabalho e a heurística de Cuoco (2008) para diferentes quantidades de cargas a serem transportadas. Observa-se que as margens de contribuição líquidas obtidas pela heurística gulosa de Cuoco (2008) ficaram, em média, 11% inferiores em relação às margens de contribuição líquidas obtidas pelo modelo proposto. A diferença máxima é observada nos problemas de 1000 cargas, com uma margem de contribuição 20% menor em relação ao ótimo; tal fato já era esperado, tendo em vista a maior dificuldade da heurística gulosa em lidar com problemas de maior porte. Nesse contexto, o número de possibilidades de cargas a serem aceitas, conjuntamente com a necessidade de

reposicionamento de contêineres vazios torna menos eficiente uma abordagem baseada em um procedimento heurístico. Com relação aos reposicionamentos, verifica-se, conforme a Tabela 2, que a diferença do número de reposicionamentos entre os modelos diminui para problemas maiores. Em contrapartida, a diferença da margem de contribuição das cargas aceitas aumenta. Dessa maneira, de acordo com os resultados obtidos, o modelo proposto proporcionou resultados significativamente melhores que os obtidos pela heurística gulosa de Cuoco (2008).

4.3. Instâncias reais com vários tipos de contêineres

Esta subseção tem por objetivo apresentar os resultados da aplicação do modelo proposto a instâncias baseadas em dados reais de empresas de navegação que operam no transporte marítimo de cabotagem no Brasil e na costa leste da América do Sul. Ao contrário do trabalho de Cuoco (2008), neste caso diferentes tipos de contêineres são considerados.

Os parâmetros desse problema, tais como número e atributos de cargas, rotas de navios, foram definidos de acordo com dados históricos obtidos dessas empresas de navegação que atuam na cabotagem na costa leste da América do Sul.

Mais especificamente, considerou-se um horizonte de planejamento de um mês (31 dias) para o transporte de contêineres. Há seis tipos de contêineres, dividido em duas categorias: i) contêineres padrão (20DC, 40DC e 40HC) e; ii) contêiner refrigerado (20RF, 40RF e 40HR), onde os números 20 e 40 indicam os comprimentos dos contêineres, em pés.

O serviço de cabotagem internacional compreende onze portos, ao longo da costa leste da América do Sul: Fortaleza (FOR), Suape (SUA), Salvador (SSA), Vitória (VIX), Sepe-

Tabela 1. Resultados do modelo proposto em comparação heurística de Cuoco (2008)

| <i>Demanda</i> | | <i>Resultados</i> | | | | | |
|----------------|---------------|-------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|
| | | <i>% Cargas Aceitas</i> | | <i>% Margem de Contribuição</i> | | <i>% Diferença do Resultado Ótimo</i> | |
| <i>Cargas</i> | <i>Margem</i> | <i>Cuoco</i> | <i>Proposto</i> | <i>Cuoco</i> | <i>Proposto</i> | <i>Cuoco</i> | <i>Proposto</i> |
| 100 | 123.647 | 99,8% | 100,0% | 99,1% | 100,0% | -0,9% | 0,0% |
| 200 | 255.939 | 98,5% | 100,0% | 93,3% | 100,0% | -6,7% | 0,0% |
| 300 | 390.851 | 97,3% | 99,8% | 90,7% | 99,5% | -8,8% | 0,0% |
| 400 | 518.930 | 97,4% | 98,8% | 89,4% | 98,2% | -9,0% | 0,0% |
| 500 | 648.994 | 95,7% | 98,0% | 86,1% | 97,8% | -11,9% | 0,0% |
| 600 | 779.305 | 93,4% | 95,7% | 84,3% | 96,2% | -12,3% | 0,0% |
| 700 | 928.279 | 90,9% | 91,3% | 80,7% | 92,4% | -12,7% | 0,0% |
| 800 | 1.052.026 | 88,0% | 87,8% | 75,1% | 88,2% | -14,9% | 0,0% |
| 900 | 1.183.551 | 86,5% | 84,0% | 73,4% | 84,1% | -12,7% | 0,0% |
| 1000 | 1.327.232 | 78,8% | 80,9% | 64,6% | 81,0% | -20,2% | 0,0% |

Tabela 2. Reposicionamento de vazios para o modelo proposto em comparação com a heurística

| <i>Demanda</i> | | <i>Reposicionamentos</i> | | | <i>Custo R\$</i> | |
|----------------|---------------|--------------------------|-----------------|--------------|------------------|-----------------|
| | | <i>Quantidade (TEUs)</i> | | | | |
| <i>Cargas</i> | <i>Margem</i> | <i>Cuoco</i> | <i>Proposto</i> | <i>% Dif</i> | <i>Cuoco</i> | <i>Proposto</i> |
| 100 | 123.647 | 4,50 | 7,50 | -40% | 9,00 | 15,00 |
| 200 | 255.939 | 37,33 | 66,83 | -44% | 74,66 | 133,67 |
| 300 | 390.851 | 77,67 | 143,67 | -46% | 155,34 | 287,33 |
| 400 | 518.930 | 176,00 | 232,50 | -24% | 352,00 | 465,00 |
| 500 | 648.994 | 265,17 | 368,00 | -28% | 530,34 | 736,00 |
| 600 | 779.305 | 373,33 | 465,50 | -20% | 746,66 | 931,00 |
| 700 | 928.279 | 473,33 | 517,17 | -8% | 946,66 | 1034,33 |
| 800 | 1.052.026 | 529,00 | 540,83 | -2% | 1058,00 | 1081,67 |
| 900 | 1.183.551 | 575,17 | 531,00 | 8% | 1150,34 | 1062,00 |
| 1000 | 1.327.232 | 559,67 | 569,50 | -2% | 1119,34 | 1139,00 |

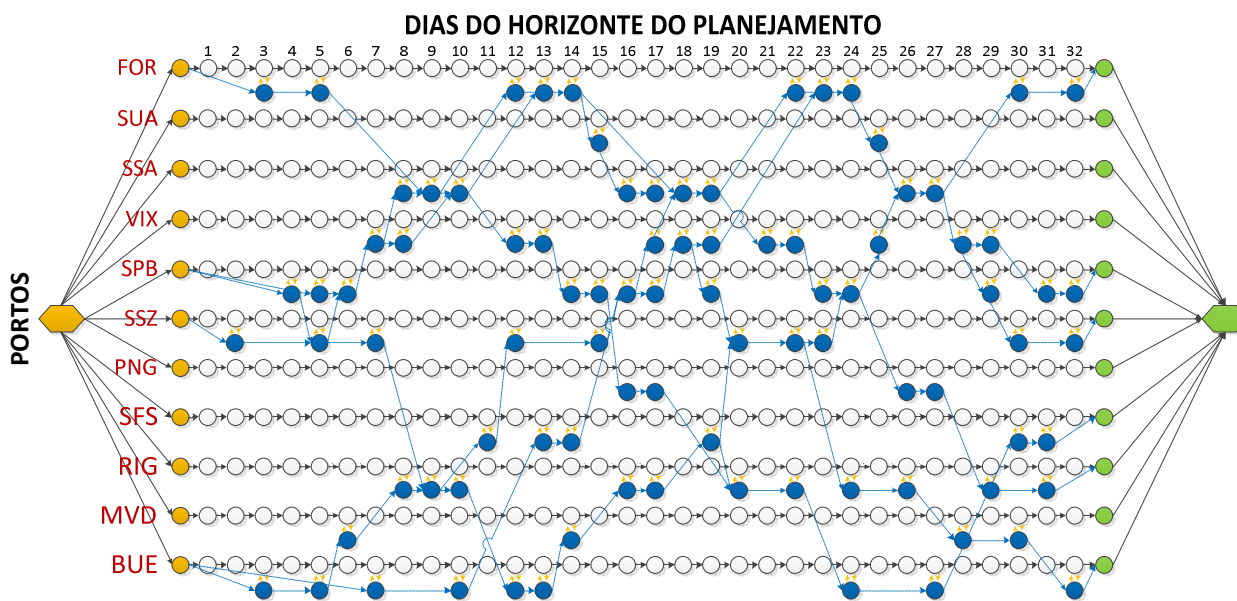


Figura 7. Representação da rede espaço-tempo para o problema de estudo

tiba (SPB), Santos (SSZ), Paranaguá (PNG), São Francisco do Sul (SFS), Rio Grande (RIG), Montevidéo (MVD) e Buenos Aires (BUE), e seis navios, cujas capacidades que variam de 600 a 1.500 TEUs e, em peso, de 7200 a 18000 toneladas, com tempos de ciclos de 42 dias (navios NAV1, NAV2 e NAV3) e de 18 dias (navios SSZ1, SSZ2 e SSZ3). Embora a modelagem proposta assim permita, não foram consideradas capacidades de cada um dos navios para cada tipo de contêiner (usualmente o contêiner do tipo refrigerado tem uma capacidade limitada, uma vez só pode ser transportado em posições do navio onde há alimentação de energia elétrica que permite manter a sua refrigeração). No entanto, os dados históricos a que se teve acesso não permitiram definir capacidades por tipo de contêiner nos navios.

A Figura 7 representa a rede espaço-tempo para esse problema. Os arcos marítimos, em azul, representam as rotas dos navios por entre os portos, cujas paradas são representadas pelos nós marítimos, também em azul, sendo embarque e desembarque por arcos de cor laranja.

Foram considerados custos unitários no transporte marítimo de contêineres, para cada um dos tipos, quando transportados vazios, bem como custos unitários para embarque e desembarque em cada um dos portos. No caso dos contêineres cheios, todos os custos unitários (por contêiner) relativos ao transporte, embarque e desembarque foram subtraídos da respectiva receita unitária de modo a obter a margem de contribuição líquida. Não foram considerados custos de armazenamento de contêineres vazios nos portos ou depósitos em terra, em virtude do fato de que as companhias de navegação assinam contratos de longo prazo com esses depósitos, sendo desconhecido o histórico de ocupação dessas áreas, o que torna praticamente impossível o rateio desses custos por contêiner por dia; adicionalmente, os valores são de ordem de grandeza reduzida, e portanto desprezíveis quando comparados aos demais custos de transporte e movimentação.

Toda a movimentação de carga é realizada somente com os contêineres pré-definidos como estoques iniciais ou embarcados nos navios para o problema, não havendo alugueiros de contêineres ao longo do horizonte de planejamento.

As cargas candidatas a ser transportadas foram geradas

com base em dados de séries históricas e em perfis que normalmente se observam na prática nas companhias de navegação. Para cada carga foram definidos os seguintes dados: i) navio que realizará o transporte; ii) datas de embarque e de desembarque; iii) tempos livres disponíveis antes do embarque e após o desembarque; iv) quantidades de contêineres de cada tipo; v) margem de contribuição (ou receita líquida); vi) peso total, incluindo tara dos contêineres; vii) critério de aceite dos contêineres e; viii) propriedade dos contêineres (próprio do embarcador ou de propriedade da companhia de navegação).

Nesse contexto, assume-se que todas as cargas permitem aceite parcial, sendo consideradas também decisões quanto a cargas que já foram aceitas e que afetam os fluxos ao longo do horizonte de planejamento. Considera-se, ainda, que todos os contêineres pertencem à companhia de navegação que realizará o transporte.

O problema de estudo corresponde a um grupo de 1.000 cargas a serem transportadas ou 24.347 TEUs. De todas as cargas candidatas ao transporte, 494 (49%) demandam somente um tipo de contêiner, 360 (36%) demandam dois tipos e 146 (15%) demandam três diferentes tipos. Os contêineres vazios disponíveis no início do horizonte de planejamento para o atendimento das cargas a serem transportadas foram alocados com estoque inicial nos portos, sendo que a sua designação aos portos foi feita de maneira aleatória de modo a levar a um desequilíbrio esperado entre oferta e demanda de contêineres, tal como ocorre na prática.

Uma demanda no transporte de contêineres de 987 TEUs (4%) já estão em atendimento no início do horizonte de planejamento, não cabendo decisão de rejeição. Outra demanda de 2.920 TEUs (11%) possui desembarque determinado para data posterior ao fim do horizonte de planejamento, o que significa que permanecem a bordo dos navios ao final do horizonte de planejamento. Os demais 20.440 TEUs (85%) possuem datas de embarque e desembarque dentro do horizonte de planejamento de 31 dias.

Os resultados do processamento do modelo matemático indicam que, de todas solicitações de cargas para o transporte, 475 cargas (47,5%) foram totalmente aceitas e 36 cargas (3,6%) foram aceitas parcialmente, totalizando 511

cargas aceitas (49,1%), o que corresponde a 10.804 contêineres (44,38%) do total de 24.347 contêineres solicitados. As demais cargas não foram aceitas primordialmente devido a falta de capacidade dos navios que operam esse serviço, inclusive decorrente da necessidade de reposicionamento de contêineres vazios.

A Figura 8 ilustra a ocorrência de demanda de cargas maior do que a capacidade do navio NAV1 em alguns trechos da sua rota ao longo do horizonte de planejamento. As áreas em escuro representam o espaço a ser ocupado no navio caso não houvesse restrições de estoques de contêineres vazios; as áreas em claro representam a ocupação do navio, também em peso, considerando todas as restrições, inclusive de estoque de contêineres vazios.

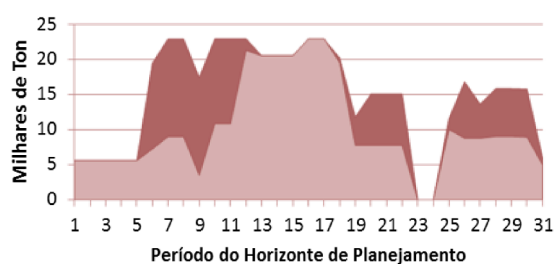


Figura 8. Tonagem ocupada no navio NAV1 com e sem restrição de vazios

No problema em estudo a margem de contribuição total, se todas as cargas fossem aceitas, é equivalente a R\$ 29.914.518. Considerando todas as restrições, a margem de contribuição das cargas selecionadas para o transporte será de R\$ 15.003.964, equivalente a 50% do total. Foram reposicionados 345 contêineres. O custo total de reposicionamento foi de R\$ 490.665, sendo que 68% foram referentes ao custo de transporte. Os demais custos referem-se ao custo de embarque e de desembarque. Deduzidos os custos, a margem de contribuição é de R\$ 14.513.299, redução de 3,3% em relação à margem de contribuição das cargas selecionadas.

O tempo de execução do modelo foi de 438 segundos (~7 minutos). Do tempo total de execução, cerca de 1,4s foi despendido na preparação do modelo, que consiste na leitura e interpretação dos dados de entrada e na construção da rede espaço-tempo em memória. O restante do tempo é referente à execução da otimização do modelo matemático utilizando o pacote de otimização GUROBI.

Com base nos resultados, pode-se verificar a aplicabilidade do modelo proposto a problemas normalmente observados em um planejamento de uma companhia de navegação, o que abre possibilidades para o uso de modelos de fluxo em rede eficientes para obtenção de respostas quanto à seleção de cargas e ao reposicionamento contêineres vazios no transporte marítimo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem proposta neste trabalho, baseada no problema de fluxo em rede espaço-tempo multiproduto, mostrou-se plenamente adequada para o problema integrado de seleção de cargas e de reposicionamento de contêineres vazios de uma empresa de navegação com o objetivo de maximizar a margem de contribuição líquida total.

Foi possível considerar as principais restrições do pro-

blema, incluindo múltiplos tipos e tamanhos de contêineres; restrições de capacidades por navio, trecho de rota e porto, e também por tipo de contêiner e global; custos e capacidades de armazenamento de contêineres nos portos; custos de reposicionamento de contêineres vazios; de calado nos portos; de tempos livres antes do embarque e depois do desembarque para movimentação e manuseio dos contêineres pelos embarcadores; de decisões de aceite parcial e de aceite total das cargas; de condições de estado inicial e final do dos navios, dentre outras.

Os experimentos computacionais realizados, que consideraram instâncias baseadas em dados reais de empresas de navegação, demonstraram a eficiência do modelo em rapidamente determinar a solução ótima. Foram realizados experimentos de grande porte, com 1000 cargas candidatas, requisitando 25 mil contêineres a serem transportados, apresentando resultados superiores quando comparados a uma heurística que resolve uma versão simplificada do mesmo problema, onde apenas um tipo de contêiner é considerado, além de não permitir levar em conta outras restrições.

Possíveis extensões deste trabalho podem incluir uma definição mais flexível das demandas de transporte dos clientes, em termos de datas, e também não fixando de antemão o navio e a rota a serem seguidos, apenas os portos de origem e destino; adicionalmente, alterações a fim de possibilitar considerar decisões quanto à frota ótima de contêineres para uma dada região, rotas ou conjunto de serviços, bem como a definição das melhores rotas dos navios e suas respectivas programações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrache, J.; T. G. Crainic e M. Gendreau (1999) *A new decomposition algorithm for the deterministic dynamic allocation of empty containers*. Technical Report of Centre for Research on Transportation, CRT 99-49, Université de Montreal.
- Barco, B. L. (1998) *A logística do contêiner vazio*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Cheung, R. K. e C. Y. A. Chen (1998) Two-Stage Stochastic Network Model and Solution Methods for the Dynamics Empty Container Allocation Problem. *Transportation Science* v. 32, n. 2, p. 142–162.
- Costa, G. A. A. D. (2006) *Modelo de margem de contribuição aplicado ao planejamento de marketing no transporte marítimo regular de contêineres*. Dissertação (Mestrado). Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Crainic, T. G. e L. Delorme (1993) Dual-ascent procedure for multicommodity location-allocation problems with balancing requirements. *Transportation Science*, v. 27, p. 90–101.
- Crainic, T. G. e M. Gendreau (1993) Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers. *Operations Research*, v. 41, n. 1, p. 102–126.
- Cuoco, M. (2008) *Otimização da seleção e alocação de cargas em navios de contêineres*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Sistemas Logísticos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Gendron, B. e T. G. Crainic (1995) A branch-and-bound algorithm for depot location and container fleet management. *Location Science*, v. 3, p. 39–53.
- Herer, Y. T. e M. Tzur (2003) Optimal and heuristic algorithms for the multi-location dynamic transshipment problem with fixed transshipment costs. *IIE Transactions*, v. 35, n. 5, p. 419–432.
- Lai, K. K.; K. K. Lam e W. K. Chan (1995) Shipping container logistics and allocation. *Journal of the Operational Research Society*, v. 46, p. 687–697.
- Maranhão Filho, E. A. (2009) *Alocação e movimentação dinâmica de contêineres: Um modelo integrado de escalonamento*. Tese

- (Doutorado). Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Nobre, M. (2006) *A gestão logística do contêiner vazio*. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Santos. Santos, 2006.
- Rezende, L. B. D. (2003) *A logística do contêiner vazio, uma nova abordagem*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Naval, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Souza, F. C. G. (2001) *Procedimentos para alocação de contêineres vazios no transporte marítimo*. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Wagner, H. e T. Whitin (1958) Dynamic version of the economic lot size model. *Manager Science*, v. 5, p. 89–96.
- White, W. W. (1972) Dynamic transshipment networks: An algorithm and its application to the distribution of empty containers. *Networks*, v. 2, n. 3, p. 211–236.
- Zambuzi, N. D. C. (2010) *Modelo de decisão para o planejamento da movimentação de contêineres vazios*. Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos, Escola Politécnica da USP. São Paulo.