Produto & Produção, vol. 19, n.1, p.14-23. 2019

RECEBIDO EM 04/04/2017. ACEITO EM 16/11/2018.

Rafael Buback Teixeira
Instituto Federal do Espírito Santo, Brasil
rafael.teixeira@ifes.edu.br

Michel Anzanello
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
anzanello@producao.ufrgs.br

Cláudio Barbieri da Cunha
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil
cbcunha@usp.br

Avaliação da eficiência de nova abordagem para roteirização de cargas com reposicionamento de contêineres vazios

Resumo

Os problemas de roteirização de cargas e de reposicionamento de contêineres vazios são importantes frente ao crescimento do mercado mundial e diferenciais competitivos no transporte de contêineres. Este artigo tem por objetivo avaliar a eficiência de uma nova abordagem para roteirização de cargas, em um modelo integrado com o reposicionamento de contêineres vazios. O modelo matemático proposto foi formulado utilizando programação linear mista-binária baseada em um modelo de rede multiproduto com restrições adicionais de capacidade. Em vista à complexidade desse tipo de problema frente aos modelos propostos atualmente na literatura, os resultados desse artigo apresentam a eficiência do modelo em termos de tempo de execução dos principais resultados de demanda e de capacidade. Percebe-se que o modelo proposto possui potencial para resolução eficiente de problemas de grande porte, auxiliando decisões reais com robustez. O tempo execução aumenta consideravelmente com o aumento da demanda ocorrendo um aumento do número de contêineres reposicionados tendo em vista que cargas mais rentáveis podem viabilizar uma decisão de reposicionamento. A complexidade principal do modelo é observada no que diz respeito às variáveis inteiras em decisões de roteirização de cargas.

Palavras-chaves: eficiência, roteirização de cargas, otimização, reposicionamento

Abstract

The cargo routing and empty repositioning problems are important to growth of world market and competitive differentials of the container transporting. This paper aims to evaluate the efficiency of a new approach for an integrated model to cargo routing and empty containers repositioning. We formulated the proposed optimization model as binary-mixed linear programming based on a network multi-commodity model additionally with capacity constraints. Considering the complexity of this problem compared to models available in the literature, the results proved the model efficiency in computational time and main measures of demand and capacity. We understand the model as efficient to solve problems of large instances, assisting real decisions with robustness. The solving time

increases significantly with increasing demand, occurring more containers repositioned in order to more profitable cargos can viability a repositioning decision. The main complexity of the model is related to integer variables of cargo routing decisions.

***Key words*:** efficiency, cargo routing, optimization, repositioning

1. Introdução

O transporte de contêineres por navios no mercado mundial tem crescido e potencializado sua importância frente aos seus diferenciais competitivos, principalmente com relação ao ganho de escala. Este mercado movimentou 140 milhões TEU's em 2010, chegando a 180 milhões em 2015 (Unctad 2015), provando a roteirização de serviços de transporte de contêineres como relevante no tocante aos ganhos envolvidos (Tran & Haasis, 2015). O serviço de transporte de contêineres pode ser definido como uma sequência fixa de portos provendo um serviço regular operado por navios de contêineres.

A unitização dos contêineres na operação de transporte aumenta a produtividade de atividades nos processos de transbordo e um melhor uso dos espaços nos navios. As rentabilidades das companhias regulares de navegação são maximizadas mediante decisões integradas que reduzem custos de manuseio e de transporte de contêineres vazios, criando oportunidades para aceitação de cargas potencialmente mais lucrativas.

O problema de roteirização de cargas em contêineres e o problema de reposicionamento de contêineres vazios considerando estas companhias são altamente relacionados. De um lado, o transporte de cargas influencia diretamente o balanço entre oferta e demanda de contêineres vazios nos portos; de outro lado, as decisões de reposicionamento de contêineres vazios de um porto de origem para um porto de destino permitem novas variáveis para a decisão de escolha de cargas potencialmente mais rentáveis. Numerosas pesquisas relevantes sobre estas decisões são encontradas na literatura (Choong et al. 2002; Dong & Song 2009; S. Wang et al. 2015; Karsten et al. 2015); de acordo com o levantamento bibliográfico realizado por Tran e Haasis (2015), a literatura apresenta estudos que integram ambos os problemas em um mesmo modelo de pesquisa operacional (Song & Dong 2012; Teixeira & Cunha 2012; Brouer et al. 2011; Shintania et al. 2007).

Shintania et al. (2007) propõem um modelo para desenho das redes de serviço de transporte de marítimo de contêineres levando em conta o reposicionamento de contêineres vazios. Agarwal & Ergun (2008) propõem uma rede de serviço regular buscando a máxima rentabilidade com base em uma demanda para o transporte e suas rentabilidades, desconsiderando custo de tranbordo. Dong & Song (2009) consideram, de maneira integrada, o problema de dimensionamento da frota e o de reposicionamento de contêineres vazios, enquanto que Song & Dong (2012) integraram o problema de roteirização de cargas em contêineres como o problema de reposicionamento de contêineres vazios. Teixeira & Cunha (2012) propõem um modelo integrado como um problema de fluxo em rede multiproduto para maximização da margem de contribuição decidindo pelo aceite das cargas para o transporte de contêineres vazios, para diferentes tipos de contêineres, navios, rotas e respectivos horários em múltiplos serviços em um mesmo porto.

Brouer et al. (2014) apresentam uma programação inteira baseada em heurística que busca encontrar o conjunto de rotas de transporte de contêineres em uma rede capacitada de modo a maximizar a rentabilidade e minimizar o custo de operação. Outras pesquisas relacionadas ao reposicionamento de contêineres vazios em múltiplos portos incluem Li et al. (2004), Song et al. (2005), Li et al. (2007) e Brouer et al. (2011). Li et al. (2007) propõem uma formulação do problema de alocação aplicado a métodos heurísticos para solucionar um problema de alocação de contêineres vazios em uma rede de múltiplos portos, com contêineres sob responsabilidade das companhias de navegação ou de aluguel, enquanto que Karsten et al. (2015) apresentam um problema de fluxo em

rede multiproduto com restrições de tempo de trajeto. Por fim, Wang et al. (2015) propõem um modelo para o problema de gestão de rentabilidade no transporte regular em sazonalidade.

O presente artigo visa avaliar a eficiência de uma nova abordagem para roteirização de carga e reposicionamento de contêineres vazios em um modelo integrado. Para tanto, apoia-se em uma rede espaço-tempo de um modelo de fluxo-máximo considerando estruturas de nós e de arcos levando em conta as principais atividades nas operações de transporte de contêineres. O modelo proposto considera ainda restrições de roteirização e de capacidade, de modo a maximizar a rentabilidade nas operações para uma demanda fixa considerando vários tipos de contêineres sob de uma rede de transporte em um determinado horizonte.

O artigo é organizado como segue. A seção 2 apresenta informações sobre a abordagem proposta, incluindo premissas e descrição do modelo. Na seção 3 são apresentados os experimentos computacionais e as discussões dos mesmos e na seção 4 as considerações finais.

2. Abordagem proposta pelo modelo

Contêineres são unidades de carga classificadas em vários tipos e que permitem a unitização de uma quantidade de produtos. A unidade TEU (*twenty feet equivalente unit*) consiste na medida equivalente de diferentes tamanhos de contêineres; 1 TEU equivale a um contêiner de 20 pés de comprimento, então 2 TEU's equivale a 40 pés de comprimento. Para o modelo proposto, é levando em consideração que o serviço de cabotagem não admite transporte oceânico; somente para portos ao longo de mesma costa em um mesmo continente o transporte é permitido.

Os embarcadores, clientes das companhias de navegação, requisitam o transporte de seus produtos à companhia regular de navegação por contêineres. A requisição de transporte consiste em um conjunto de contêineres de cada tipo transportados de um porto de origem para um porto de destino. As companhias reposicionam seus contêineres vazios sem receita direta em cenários de capacidade de transporte limitada de modo a atender uma demanda proposta; restrições de capacidade são consideradas também em navios e em operações de carga e de descarga.

A rentabilidade no atendimento das requisições de transporte é fator principal na decisão de rejeição. Normalmente, a rentabilidade é definida pela margem de contribuição oriunda de cada requisição de transporte. Uma carga é um conjunto de requisições de uma ou mais solicitações de um mesmo embarcador, considerando os seguintes requisitos e atributos: i) **período e porto de origem:** quando e onde os produtos são disponíveis para serem utilizados em contêineres associados à carga para carregador em um navio; ii) **período e porto de destino:** quando e onde contêineres associados à carga para descarregamento de um navio estão disponíveis para serem desunitizados em produtos; iii) **Número de períodos necessários para unitização** de contêineres da carga do embarcador no porto de origem antes do embarque; iv) **Número de períodos necessários para desunitização** de contêineres da carga do embarcador no porto de destino após o desembarque; v) **Quantidade de contêineres por tipo e comprimento;** vi) **Total de peso bruto da carga,** incluindo peso de tara de diferentes tipos de contêineres e peso de produtos compondo uma carga unitizada; vii) **Propriedade de todos contêineres** associados à carga; Assume-se como verdadeiro quando de propriedade da companhia de navegação; viii) **Rentabilidade da carga** quando a mesma é aceita para o transporte; e ix) **Penalidade da carga** quando a mesma é rejeitada para o transporte.

Se contêineres são da companhia de navegação, o transporte de carga pode ser realizado se existe disponibilidade de contêineres vazios; se não, a carga é rejeitada. Caso os contêineres sejam do transportador para uma determinada carga, somente restrições de capacidade nos navios limitam seu aceite. Uma operação de transporte de contêineres considera diversas operações, tais como unitização, carregamento, transporte marítimo, transbordo, descarga e desunitização, reposicionamento e estocagem de contêineres. A unitização é conhecida como um período de tempo para a carga ser unitizada no porto quando os contêineres são vazios e disponíveis. Para a desunitização o

entendimento é similar, sendo conhecida como o tempo para desunitizar os produtos dos contêineres usados pela carga após o desembarque do navio.

Este estudo propõe um modelo de fluxo em rede multiproduto em uma rede espaço-tempo considerando decisões de roteirização de cargas e de contêineres. As seguintes decisões são consideradas no modelo de modo integrado:

- Qual carga transportar; qual sua rota específica ao longo do serviço da rede, considerando quantos vazios necessários disponíveis para unitização; um ou mais navios necessários para transportar de modo a carregar, transbordar e descarregar; e quando os contêineres vazios estarão disponíveis após a desunitização da carga?

- Quantos contêineres vazios devem ser reposicionados; qual a origem e o destino desses vazios para serem transportados e qual navio deve alocado para o transporte?

Baseado nessa formulação do problema, dois subproblemas são definidos, e premissas de modelagem são então apresentadas na sequência:

- Aceitação e roteirização de carga objetivando a maximização da rentabilidade líquida com a dedução de custos de reposicionamento de vazios e de operações de transporte de carga. Para tanto, são consideradas restrições de capacidade de frota, portos e disponibilidade de contêineres vazios em tempo para atendimento do transporte.

- Contêineres vazios para reposicionamento em ordem para assegurar que cargas sejam atendidas em todos os portos e todas as datas no horizonte de planejamento, de acordo com a aceitação e roteirização das cargas.

Premissa 1. Contêineres são reutilizados e podem ser reposicionados para esta finalidade somente por modal marítimo pelos navios considerados na rede de serviços. O transporte terrestre entre portos não é considerado.

Premissa 2. A rede de serviço considera um horizonte fixo e discreto em períodos constantes, uma quantidade conhecida de navios e uma escala de horários e dias fixos para atendimento.

Premissa 3. Todos os contêineres da carga são de propriedade da companhia de navegação ou do embarcador totalmente. Parcialidade não é permitida.

Premissa 4. Uma oferta ou demanda externa de contêineres não é considerada como uma decisão do modelo, mas pode ser considerada como uma restrição de fluxo na rede.

Premissa 5. Substituição do tipo de contêiner ou de seu comprimento não é uma decisão do modelo na busca de viabilizar o aceite de determinada carga.

Premissa 6. Atividade de realocação de contêineres vazios nos navios durante carga, descarga ou reposicionamento não é considerado nesse modelo.

Normalmente, a literatura apresenta as demandas de contêineres em TEUs (Li et al. 2004; Li et al. 2007; Choong et al. 2002; Dong & Song 2009); neste estudo, a demanda é mensurada em unidades por tipo de contêineres. A premissa 1 é comum na literatura para redução da complexidade e para refletir a realidade (Li et al. 2004; Li et al. 2007; Choong et al. 2002; Dong & Song 2009). Contêineres são transportados diretamente ou envolvem transbordo (Song et al. 2005; Teixeira & Cunha 2012). Para o reposicionamento de vazios, o modelo proposto não impõe limites para transbordo (Song & Dong 2012). Na literatura, é comum adotar uma premissa para limitar paradas em um mesmo porto para diferentes navios (Song et al. 2005; Wang & Meng 2011); no modelo proposto, não há esta limitação (Teixeira & Cunha 2012). A premissa 1 considera ainda que as rotas de serviços são determinadas previamente para esse tipo de decisão (Song & Dong 2012). A premissa 2 é necessária para aplicar este problema em uma rede espaço-tempo fixa e discreta (Li et al. 2004; Li et al. 2007; Zambuzi & Cunha 2010; Teixeira & Cunha 2012). Acerca da premissa 3, o modelo permite contêineres vazios tanto da companhia de navegação quanto dos embarcadores; tal premissa é encontrada na literatura para conceder maior flexibilidade ao modelo (Zambuzi & Cunha 2010; Teixeira & Cunha 2012). A premissa 5 considera o fato que as quantidades e tipos de contêineres das cargas não podem ser substituídas para viabilizar aceite durante a otimização. E a premissa 6 é

necessária para reduzir também a complexidade do problema. Enfatiza-se que custos de carregamento e de descarregamento de contêineres são parâmetros ajustáveis no modelo.

Pelo exposto, o modelo integrado de roteirização de cargas e de reposicionamento de contêineres vazios pode ser formulado como uma programação linear mista-binária baseada em um modelo de rede multiproduto com restrições adicionais de capacidade. A rede espaço-tempo consiste de nós e arcos de inventário para atividades de estocagem de contêineres vazios nos portos. Arcos e nós marítimos, adicionalmente a arcos de embarque e desembarque, bem como arcos de transbordo, permitem atividades no transporte de carga e de reposicionamento de vazios. Nós e arcos específicos para decisões de aceite e de roteirização de carga são considerados para um fluxo binário específico. O fluxo de contêineres de carga é diretamente relacionado ao fluxo binário.

O modelo proposto tem por objetivo maximizar a rentabilidade total no horizonte finito (deduzindo custos de operação). As variáveis no modelo determinam os fluxos de contêineres cheios e vazios, para cada um dos tipos, ao longo da rede de serviços, levando em conta a roteirização das cargas determinada por variáveis binárias sobre a mesma rede. As operações consideram atividades de carga e de descarga, de transporte e de transbordo de contêineres. Os fluxos de contêineres em cada um dos arcos da rede, por tipo de contêineres, são determinados pelo modelo associado ao fluxo binário que determina a rota de cada carga. Em virtude do fluxo binário, a rede é constituída por arcos específicos para fins de decisão de aceite ou de rejeição de cargas. Restrições específicas do modelo do fluxo em rede permitem o balanceamento entre contêineres cheios e vazios, bem como do fluxo binário para roteirização. As capacidades do sistema são limitadas por restrições de capacidade em TEUs e peso máximo, bem como limites superiores e inferiores no fluxo de contêineres. A restrição inferior, nesse caso, é utilizada para determinação do estoque inicial de contêineres em cada porto. Uma aplicação utilizando limites superiores é a capacidade limitada no número de movimentos realizados para manuseio de contêineres nos portos. É importante enfatizar que as formulações matemáticas do método não são apresentadas por restrição de espaço.

3 Experimentos Computacionais

Para atingir o objetivo delineado de propor uma estratégia híbrida de produção com a utilização da otimização multiobjetivo, foi analisado um estudo de caso único, baseado numa empresa de grande porte de corte e distribuição de bobinas de aço que trabalha com ambientes híbridos de produção.

Trata-se de um estudo de caso utilizando a abordagem qualitativa e quantitativa. Apresentam-se os resultados através da resolução do problema de programação linear. Os pesquisadores exerceram a função de observadores diretos, auxiliando na análise final dos dados.

Conforme Martins (2008) destaca, estudo de caso é uma estratégia metodológica de se fazer pesquisa nas ciências sociais. Trata-se de uma metodologia aplicada para avaliar ou descrever situações dinâmicas em que o elemento humano está presente. Busca-se aprender a totalidade de uma situação, descrever, compreender e interpretar a complexidade de um caso concreto, mediante a análise de um objeto delimitado.

Yin (2001) prescreve táticas diferenciadas para cada tipo de estudo de caso. Em relação ao estudo de caso único, o autor o prescreve quando este representa o caso decisivo para testar uma teoria bem formulada, seja para confirma-la, seja para contesta-la, seja ainda para estender a teoria. Esse último, é a finalidade desse estudo pois pretende-se, a partir dessa análise, que ela possa ser estendida a outras empresas que encontrem o mesmo tipo de problema: definir entre produzir para estoque ou para cliente.

O modelo foi implementado em linguagem Python com pacote de otimização Gurobi. Para utilização das instâncias, utilizou-se planilha eletrônica. Para os experimentos computacionais foi utilizada uma *workstation* com processador Intel® Xeon® 3,50Ghz com 4 núcleos e memória RAM de 32Gb, em sistema operacional Windows 10 Pro 64bits. Todas as instâncias analisadas foram

geradas considerando um horizonte finito de planejamento de 30 dias, tendo uma rede de serviços composta por 10 portos e 3 navios.

Para o cenário base foram considerados dois tipos de contêineres: 20DC (tara = 5t, TEU = 1) e 40DC (tara = 10t, TEU = 2) e portos, ao longo da costa brasileira, atendendo as cidades de Fortaleza (FOR), Suape (SUA), Maranhão (MCZ), Salvador (SSA), Vitória (VIX), Rio de Janeiro (RIO), Santos (SSZ), São Francisco do Sul (SFS) e Rio Grande (RIG). Adicionalmente foi considerado o porto de Buenos Aires (BUE), que na prática compõe a rede de cabotagem brasileira. Somente o porto da cidade de Vitória apresentou restrição quanto ao peso dos navios, sendo de 5kt. Os custos de embarque ou desembarque foram de 5 R$/TEU para contêineres de cargas e 10 R$/TEU para reposicionamento de vazios. Não foram consideradas restrições para a movimentação de contêineres nos portos, seja para embarque, desembarque ou transbordo, apesar do modelo permitir considerar esse tipo de restrição. Os navios possuem capacidades em TEU e em peso de carga, sendo o navio FRO com 3 kTEU e 12kt, navio FMC com 2,5 kTEU e 9kt e navio FMN com 4,2 kTEU e 10kt de capacidade.

Foram distribuídos contêineres de cada tipo para compor os estoques iniciais nos portos, sendo de 20 a 300 contêineres 20DC e de 10 a 200 contêineres 40DC, totalizando 2040 contêineres. Não foram consideradas restrições específicas na capacidade por tipo de contêineres, apesar de que o modelo permite considerar tal tipo de restrição. Rotas conhecidas dos navios foram consideradas de modo que o navio FRO atendesse seis portos, o navio FMC atendesse seis portos e o navio FMN atendesse quatro portos. O custo de transporte em cada um dos trechos variou até 15 R$/TEU transportado quando cheio e 6 R$/TEU quando vazio (para reposicionamento). O custo é R$ 10/TEU/dia durante a atividade de transbordo. Não houve restrições específicas de capacidade para trechos da rede de serviços, embora o modelo proposto permita considerar esse tipo de restrição.

Para a composição das cargas, foram inicialmente identificadas 267 possíveis combinações de origens e destinos na rede de serviços, sendo 142 que necessitam transbordo (utilizando, assim, mais de um navio para o atendimento). Uma escolha aleatória de combinação foi realizada para cada uma das cargas tendo uma chance de 20% para as combinações que precisam de transbordo. Para os experimentos aplicados, foram desconsiderados tempos para unitização ou desunitização dos contêineres. Todos os contêineres são de propriedade da companhia de navegação. O preço do serviço de transporte das cargas é de 81,49 R$/TEU em média. A penalidade pelo não cumprimento do transporte considerado é de 10% sobre o preço cobrado para o transporte da carga. A margem bruta e a penalidade são parâmetros configuráveis em cada carga, individualmente.

As cargas foram compostas por contêineres de cada tipo, sendo que as cargas podem transportar somente contêineres do tipo 20DC, ou somente do tipo 40DC ou de ambos. Cada carga transporta, para as instâncias consideradas, em média 21 contêineres 20DC (mín = 0 e máx = 97) e 6 contêineres 40DC (mín = 0 e máx = 29). Para todas as cargas são consideradas decisão de livre de aceite ou de rejeição da carga. É possível que o modelo considere o aceite obrigatório, mas tal restrição não foi considerada. A capacidade dos navios e a capacidade de vazios disponíveis nos portos variam de 50% a 200% sobre o cenário base. Também foram consideradas variações de 50 a 200 cargas. Com base nas combinações propostas, foram executadas 64 instâncias geradas aleatoriamente.

Analisando a variação de capacidade dos navios, percebe-se que contêineres vazios disponíveis nos portos variam de 1480 a 5920 TEU, com média 3700 TEU com base nas instâncias consideradas. A demanda de contêineres varia de 1709 a 6464 TEU, com média 4191 TEU. O número de cargas para o transporte varia de 50 a 200 cargas, com média 125. A margem de contribuição total bruta esperada, por instância, é de R$ 341.713 (sem considerar os custos no modelo). Foi considerado critério de parada da otimização para *gap* < 1% ou número de interações *B&B* superior a 10.000. Alguns resultados tiveram instâncias que extrapolaram o número de iterações e apresentam o melhor resultado obtido. A Tabela 1 apresenta os resultados, onde verifica-se que, em média, 150% ou 200% da capacidade do navio em comparação com o cenário base apresentou resultados semelhantes em termos de número de contêineres transportados. Observa-se que a complexidade para execução aumenta consideravelmente para cenários em que a capacidade dos navios é 50% do cenário base, com um tempo médio superior a 1460s de execução.

De modo semelhante, a Tabela 2 traz a variação da capacidade de oferta de contêineres vazios (estoque inicial), onde a média de capacidade de navios torna-se fixa para cada variação, sendo 12 kTEU e 38,8kt de capacidade geral. Observa-se que a capacidade de contêineres vazios disponíveis

nos portos, quando 50% do cenário base, apresenta uma complexidade considerável, visto que a média de execução de instância é de 2304s.

Tabela 1 – Média das instâncias para variação da capacidade dos navios

Capacidade dos navios máxima			**Atendimento**			
	TEU	**Tonelada**	**% Cargas Aceitas**	**TEU aceitos**	**Margem Líquida**	**Exec. Média**
50%	4.850	15.500	67%	1%	R$ 167.355	1.460s
100%	9.700	31.000	78%	3%	R$ 214.656	687s
150%	14.550	46.500	81%	7%	R$ 228.336	450s
200%	19.400	62.000	82%	7%	R$ 231.044	434s

Tabela 2 – Média das instâncias para variação da capacidade de vazios nos portos

Capacidade de vazios		**Atendimento**			
	Estoque Vazio Médio	**% Cargas Aceitas**	**TEU aceitos**	**Margem Líquida**	**Exec. Média**
50%	1.480	71%	63%	R$ 162.522	2.304s
100%	2.960	78%	73%	R$ 212.940	376s
150%	4.440	79%	76%	R$ 228.457	216s
200%	5.920	80%	77%	R$ 237.452	136s

Considerando a média do resultado das instâncias para a variação da demanda de cargas e contêineres, de acordo com a Tabela 3, verifica-se que o tempo de execução aumenta consideravelmente com o aumento da demanda, sendo que a média de execução para cenários com 200 cargas é de 1985s (33 min.). Verifica-se que, pelo menos, 10% dos contêineres transportados foram reposicionados; além disso, quanto maior a demanda de cargas, maior o percentual de contêineres reposicionados. Tendo-se em vista que o modelo visa encontrar a melhor seleção de cargas de modo a maximizar a margem de contribuição líquida total, cargas mais rentáveis podem viabilizar uma decisão de reposicionamento.

Tabela 3 – Média das instâncias para variação da demanda de cargas e contêineres para o transporte

Demanda		**Atendimento**				
Cargas	**TEU**	**% Cargas Aceitas**	**% Cont. Reposic.**	**% TEU aceitos**	**Margem Líquida**	**Exec. Média**
50	1.709	84%	11%	84%	R$ 107.475	1s
100	3.412	76%	10%	76%	R$ 196.863	111s
150	5.177	67%	13%	67%	R$ 256.833	935s
200	6.464	61%	15%	61%	R$ 280.200	1985s

Comparando a capacidade de vazios com a capacidade de cheios quando considerado 50% dessa (ver Tabela 4), a demanda que foi aceita para o transporte não cresce, tanto para o percentual de cargas aceitas quanto para percentual de TEU. Em contrapartida, o percentual de TEU vazio reposicionado com o aumento da capacidade de vazios diminui, efeito esperado quando mais contêineres são disponibilizados nos portos como estoque inicial, levando a uma redução de custo de transporte de vazios.

Observa-se um efeito interessante no que diz respeito à oferta de vazios nos portos. Quanto maior a oferta média de contêineres vazios nos portos, para fins de atendimento das cargas, menor a quantidade média de cargas aceitas; ao contrário, uma quantidade maior de contêineres é movimentada. Isso pode ser entendido como alternativa do modelo em transportar uma carga de um porto a outro, de modo a aproveitar os contêineres transportados em outra carga para os portos seguintes, evitando, assim, o reposicionamento. O reposicionamento aumenta em razão menor quando a capacidade dos navios aumenta, criando uma vantagem no aceite de cargas mais rentáveis disponíveis em distantes pontos do espaço- tempo.

Tabela 4 – Comparativo entre capacidade de vazios e de navios

Exec. Média (s)	**Capacidade Navios**			
Capacidade Vazios	50%	100%	150%	200%
50%	4.594s	2109s	1412s	1102s
100%	392s	226s	297s	588s
150%	453s	307s	83s	20s
200%	402s	106s	8s	26s

(a) Execução média, em segundos

% Carga Aceita	**Capacidade Navios**			
Capacidade Vazios	50%	100%	150%	200%
50%	65%	72%	74%	74%
100%	68%	79%	81%	83%
150%	68%	80%	85%	85%
200%	69%	80%	85%	86%

(b) Percentual de cargas aceitas

% TEU Aceito	**Capacidade Navios**			
Capacidade Vazios	50%	100%	150%	200%
50%	57%	64%	65%	65%
100%	61%	74%	74%	77%
150%	62%	77%	77%	81%
200%	62%	78%	78%	84%

(c) Percentual de TEU aceito e transportado

% TEU Repos.	**Capacidade Navios**			
Capacidade Vazios	50%	100%	150%	200%
50%	17%	21%	22%	22%
100%	8%	12%	14%	15%
150%	6%	8%	11%	12%
200%	4%	8%	10%	11%

(d) Percentual de TEU vazio reposicionado

4 Considerações Finais

A eficiência do modelo analisado para a solução de problemas de roteirização de cargas e de reposicionamento de contêineres vazios foi analisada em termos de tempo computacional para a execução do método de otimização, bem como em termos dos principais resultados de demanda e de capacidade. É verificado que o modelo possui potencial para a resolução eficiente de problemas de grande porte, com demandas superiores a 6 mil contêineres transportados em 200 cargas para um horizonte de tempo de 30 dias, em cenário de cabotagem com 10 portos e 3 navios para o serviço de transporte. A complexidade principal do modelo implementado observada é ocasionada pela formulação que utiliza programação linear mista-binária baseada em um modelo de rede multiproduto com restrições adicionais de capacidade. Exige uma necessidade maior de espaço computacional e de iterações para a otimização. Em contrapartida, frente às diversas restrições consideradas, muito condizentes com as decisões que ocorrem nas atividades reais de planejamento e execução no transporte de contêineres por companhias regulares de navegação, o modelo apresenta robustez e aptidão para o auxílio às decisões reais nos portes de instâncias analisados. Por fim, ressalta-se a necessidade de atenção às restrições diretamente associadas à demanda de cargas, tendo-se em vista que o aumento da demanda aumenta potencialmente a complexidade na resolução do modelo. Como próximos passos, o modelo proposto será analisado de modo a endereçar essa complexidade, permitindo redução de tempo de execução computacional e considerar instâncias mais robustas.

Referências

Agarwal, R. & Ergun, O., 2008. Ship Scheduling and Network Design for Cargo Routing in Liner Shipping. *Transportation Science*, 42(2), pp.175–196.

Brouer, B.D., Desaulniers, G. & Pisinger, D., 2014. A matheuristic for the liner shipping network design problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, pp.42–59. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554514001665.

Brouer, B.D., Pisinger, D. & Spoorendonk, S., 2011. Liner Shipping Cargo Allocation with Repositioning of Empty Containers. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 49(2).

Choong, S.T., Cole, M.H. & Kutanoglu, E., 2002. Empty container management for intermodal transportation networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(6), pp.423–438.

Dong, J.-X. & Song, D.-P., 2009. Container fleet sizing and empty repositioning in liner shipping systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6), pp.860–877. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.05.001.

Karsten, C.V. et al., 2015. The time constrained multi-commodity network flow problem and its application to liner shipping network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 76, pp.122–138. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136655451500006X.

Li, J.A. et al., 2007. Allocation of empty containers between multi-ports. *European Journal of Operational Research*, 182(1), pp.400–412.

Li, J.A. et al., 2004. Empty container management in a port with long-run average criterion. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(1-2), pp.85–100.

Shintania, K. et al., 2007. The container shipping network design problem with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(1), pp.39–59.

Song, D. et al., 2005. On cost-efficiency of the global container shipping network. *Maritime Policy & Management*, 32(1), pp.15–30.

Song, D.-P. & Dong, J.-X., 2012. Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10), pp.1556–1575. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261512001075.

Teixeira, R.B. & Cunha, C.B., 2012. Modelo integrado para seleção de cargas e reposicionamento de contêineres vazios no transporte marítimo. *Revista Transportes*, 1, pp.59–70.

Tran, N.K. & Haasis, H.-D., 2015. Literature survey of network optimization in container liner shipping. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2-3), pp.139–179. Available at: http://link.springer.com/10.1007/s10696-013-9179-2.

Unctad, 2015. *Review of Maritime Transport -Annual Report*,

Wang, S., Liu, Z. & Bell, M.G.H., 2015. Profit-based maritime container assignment models for liner shipping networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 72, pp.59–76. Available at: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84916910893&partnerID=tZOtx3y1.

Wang, S. & Meng, Q., 2011. Schedule Design and Container Routing in Liner. *Transportation Research Record*, (2222), pp.25–33.

Wang, Y., Meng, Q. & Du, Y., 2015. Liner container seasonal shipping revenue management. *Transportation Research Part B: Methodological*, 82, pp.141–161. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019126151500212X.

Zambuzi, N. & Cunha, C.B., 2010. A decision support system for the planning of empty containers repositioning. In *Proceedings of IAME conference*. Lisbon (Portugal).